

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

ДУМІН ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 537.87

ВИПРОМІНЮВАННЯ І РОЗПОВСЮДЖЕННЯ  
НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ У НЕЛІНІЙНИХ,  
НЕСТАЦІОНАРНИХ ТА БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

Подається на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис

**Робота виконана** в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Катрич Віктор Олександрович**,  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна МОН України,  
проректор з наукової роботи.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, старший  
науковий співробітник  
**Прокопенко Юрій Володимирович**,  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу  
радіофізики твердого тіла;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чурюмов Геннадій Іванович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки МОН України,  
професор кафедри фізичних основ електронної  
техніки;

доктор фізико-математичних наук, старший  
дослідник,  
**Ячин Володимир Васильович**,  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
завідувач науково-дослідного відділу теоретичної  
радіофізики.

Захист відбудеться «07» травня 2021 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий « 07» квітня 2021р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради \_\_\_\_\_

(підпис)

**Юрій АРКУША** \_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Коло практичних застосувань нестационарних електромагнітних сигналів постійно розширюється. Цей процес, мабуть, і в майбутньому не буде сповільнюватися, що в першу чергу пов'язано з бурхливим розвитком і надзвичайним поширенням цифрової обчислювальної техніки і цифрових засобів зв'язку. Однак не можна сказати, що у вищезазначених областях застосування надширокосмугових сигналів їхні властивості використані повністю. Це пов'язано з наявністю цілого ряду нерозв'язаних задач як теоретичного, так і практичного плану. Мабуть, головною серед них є задача випромінювання нестационарних сигналів та перетворення часової форми амплітуди полів у нелінійному середовищі у випадку, коли миттєве значення амплітуди поля досягає настільки таких величин, що навіть звичайне середовище виявляє нелінійні властивості. На практиці це може мати місце у надпотужних імпульсних випромінювачах спеціального призначення для дистанційної зупинки транспортних засобів, виведення з ладу електронної техніки, радіолокаційного обладнання тощо. Також такими потужними структурами є високовольтні рельсотрони сучасного корабельного обладнання запуску літаків і надзвукових снарядів.

Особливий інтерес для задач, коли використовуються нестационарні поля у ближній зоні антен, наприклад, для опромінення підсилюючої поверхні чи біологічних об'єктів, становлять методи у часовому просторі, серед яких можна виділити такі, що також використовують модове представлення електромагнітних полів.

З цієї ж причини потребують дослідження енергетичні та часові перетворення електромагнітного поля у ближній зоні випромінювачів, таких як мале джерело електричного струму. На відміну від класичної задачі про випромінювання диполя Герца потребує вивчення випромінювач із скінченною довжиною та товщиною джерела струму. Утворення вільної хвилі пропонується досліджувати на прикладі перетворення нестационарної Т-хвилі на випромінюючій апертурі коаксіального хвилеводу у відбиті хвилеводні хвилі та випромінені хвилі з урахуванням впливу геометрії задачі й параметрів збуджуючого імпульсного сигналу на ефективність випромінювання.

Так як подібна структура не може випромінювати вздовж нормалі до апертури, потребує дослідження за допомогою прямих числових розрахунків випромінювання з відкритого кінця коаксіального хвилевода зі зміщеним фланцем і вивчена можливість використання такого випромінювача у якості елемента антенної решітки.

Покращення напрямлених і частотних характеристик можна досягти використанням комбінованих надширокосмугових вібраторно-щілинних випромінювачів, що є одночасно випромінювачами як електричного, так і магнітного типу, надширокосмуговими аналогами випромінювача Клевіна. На основі числового розрахунку можлива оптимізація їх параметрів.

Вважається перспективним використання оператора поширення хвильоводної хвилі у часовому просторі для вивчення можливості компенсації дисперсійних спотворень у хвильоводі часової форми випроміненого з його апертури поля на основі аналітичних розв'язків еволюційних рівнянь і виправлення дифракційних спотворень.

Дослідження впливу імпульсного електромагнітного поля на біологічні структури потребує розв'язання задачі визначення просторового розподілу імпульсного електромагнітного поля плоскої хвилі у плоскому шаруватому діелектрику з врахуванням втрат і дисперсії та проведення електродинамічного моделювання теплової дії імпульсного поля на різні біологічні об'єкти. Викликає інтерес порівняння біологічної дії монохроматичних електромагнітних полів і надширокосмугових імпульсних з різними спектральними та часовими параметрами, різними дозами та експозиціями на живі людські клітини. Для покращення показників однорідності розподілу поля у біологічних розчинах з живими клітинами необхідно створити спеціальну установку для опромінення біологічних розчинів імпульсним електромагнітним полем.

Потребує вирішення актуальна задача виявлення та розпізнавання металевих і діелектричних об'єктів, що знаходяться під поверхнею ґрунту, параметрів шаруватих діелектричних структур, які моделюють біологічні тканини, шляхом зондування імпульсним надширокосмуговим електромагнітним полем. Цікавим є застосування для аналізу відбитого поля штучної нейронної мережі. Потребують вивчення випадки різних розмірів і форм підповерхневих об'єктів, глибин їх залягання, опромінення плоскою хвилею з нормальним падінням чи майже точковим джерелом, стійкість розпізнавання до адитивних шумів різного рівня, прийому одиночним приймачем чи рознесеною у просторі антенною системою, що здійснює прийом хвиль різної поляризації, попередньої обробки прийнятих сигналів. Цей підхід можна використати для визначення положення рухомих об'єктів у просторі.

Таким чином, дисертаційне дослідження спрямоване на розвиток еволюційного підходу до задач випромінювання нестаціонарних електромагнітних хвиль і на вирішення актуальної наукової проблеми удосконалення методів розрахунку цих полів у нелінійних, неоднорідних, нестаціонарних і біологічних середовищах, покращення характеристик надширокосмугових випромінювачів, застосування імпульсних хвиль для підповерхневого зондування, визначення положення та розпізнавання прихованих об'єктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Тематика дисертації нерозривно пов'язана з пріоритетною науковою тематикою факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна й є складовою частиною виконаних на факультеті держбюджетних НДР, в яких автор брав участь як виконавець, відповідальний виконавець і керівник: “Збудження, розсіяння та формування електромагнітних полів магнітними та електричними випромінюючими структурами у матеріальному середовищі” (номер державної реєстрації: 0108U001643), “Електродинаміка комбінованих випромінювачів

магнітно-електричного типу в об'ємах з ідеально провідними й імпедансними границями" (номер державної реєстрації: 0112U006929), "Розробка та моделювання нових засобів формування спрямованого випромінювання надкоротких імпульсних сигналів" (номер державної реєстрації: 0107U000692), "Широкопasmові та адаптивні антенні системи і антенні решітки на основі радіокераміки" (номер державної реєстрації: 0118U002020), "Збудження і випромінювання електромагнітних полів неоднорідностями у хвилеведучих і хвилеводно-резонаторних структурах" (номер державної реєстрації: 0105U000707), "Дослідження дифракції електромагнітних хвиль та нестационарних полів на регулярних та нерегулярних однорідностях у хвилеводних структурах" (номер державної реєстрації: 0102U000356), "Електродинамічне моделювання впливу нестационарних широкопasmових електромагнітних полів на біологічні об'єкти" (номер державної реєстрації: 0107U000679), "Електродинамічне моделювання впливу імпульсних надширокопasmових електромагнітних полів на біологічні об'єкти" (номер державної реєстрації: 0110U001428), "Електродинамічне моделювання впливу імпульсних надширокопasmових полів на клітинні системи і на загальну життєздатність біологічних об'єктів" (номер державної реєстрації: 0112U005887), "Моделювання та дослідження відкритих нелінійних нанорозмірних електродинамічних систем із нестационарним і гармонічним збудженням для перетворення полів та створення елементів спінтроники" (номер державної реєстрації: 0114U002585), "Імпульсні та синусоїдальні поля у нелінійних і шаруватих електродинамічних структурах та наносистемах як перетворювачах полів і моделей елементів спінтроники" (номер державної реєстрації: 0117U004851), "Формування гармонічних і нестационарних електромагнітних полів багатоелементними, багаторезонансними структурами випромінювачів електричного і магнітного типів з використанням металодіелектричних включень" (номер державної реєстрації: 0116U000814).

**Мета та завдання дослідження.** *Метою дисертаційної роботи є виявлення фізичних закономірностей процесів випромінювання та поширення нестационарних полів у нелінійних, неоднорідних, нестационарних та біологічних середовищах, нагріву діелектриків для їх практичного використання.*

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати у часовому просторі такі задачі:

- отримання системи еволюційних рівнянь для необмеженого простору, що може бути заповнений поперечно-неоднорідним, нестационарним, радіально-неоднорідним середовищем, поширення нестационарних хвиль у модельному випадку радіально-неоднорідного середовища;
- поширення нестационарної електромагнітної хвилі у нелінійному середовищі в аналітичному вигляді за допомогою методу малих збурень у першому наближенні;
- випромінювання диполя Герца та систем на його основі, дротяної антени, апертури прямокутного, круглого та коаксіального хвилевода, в тому числі зі зміщеним центральним провідником, вібраторно-щілинного випромінювача;

- розрахунку параметрів експериментальних установок для опромінення біологічних об'єктів і просторового розподілу поля та його теплової дію;
- визначення параметрів шаруватих структур і розпізнавання прихованих в них об'єктів та їх розташування за допомогою опромінення імпульсним полем та аналізу відбитого поля штучною нейронною мережею.

*Об'єктом дослідження* є випромінювання та поширення нестаціонарних електромагнітних полів у нелінійних, нестаціонарних, неоднорідних та біологічних середовищах.

*Предметом дослідження* є просторові та часові перетворення нестаціонарних полів в обмежених і необмежених неоднорідних, нестаціонарних, нелінійних середовищах, формування електромагнітних хвиль у ближній зоні випромінювачів, теплової дії нестаціонарного поля та отримання інформації з імпульсного поля після його взаємодії з середовищами та локальними об'єктами.

**Методи дослідження.** Для виконання поставлених задач використовується метод еволюційних рівнянь, в рамках якого вихідна нестаціонарна тривимірна задача електродинаміки перетворюється до задачі для одновимірних нестаціонарних рівнянь шляхом побудови модового базису для електромагнітного поля з довільною часовою залежністю. Це також дозволяє зменшити розмірність задачі на дві одиниці, що суттєво спрощує вихідну задачу незалежно від того, чи шукається аналітичний розв'язок, чи числовий. При цьому також зберігаються в явному вигляді довільні часові залежності як джерел поля, так і параметрів середовища. Даний підхід використовується для отримання системи еволюційних рівнянь для необмеженого простору у випадку, коли середовище є не тільки шарувато неоднорідним і нестаціонарним, але і наявна залежність параметрів середовища від поперечних координат і для випадку радіально-неоднорідного середовища. Еволюційні рівняння, в свою чергу, розв'язуються як аналітично методом перетворення Лапласа, так і одновимірним методом кінцевих різниць у часовому просторі.

Дослідження нестаціонарного електромагнітного поля у нелінійному середовищі проводиться також на основі еволюційного підходу із побудовою алгоритму ітеративного врахування нелінійності суто у часовому просторі, використовуючи метод малих збурень.

Задача випромінювання диполя Герца розв'язується аналітично у часовому просторі шляхом врахування більшої кількості доданків у розкладі в ряд Маклорена розв'язку, що отримується методом векторного потенціалу.

В якості моделі збуджуючого струму дротяного вібратора вибирається імпульс, що поширюється вздовж довгої лінії з експоненціальним спаданням амплітуди, яке отримується з експериментальних даних. Враховується відбиття хвилі струму від кінця вібратора та від точки живлення вібратора.

Методом функції Рімана розв'язується задача знаходження поля всередині хвилевода. В наближенні Кірхгофа, тобто, нехтуючи спотворенням поля на відкритому кінці хвилевода, методом векторного потенціалу у часовому просторі знаходиться випромінюване поле. Отримані результати перевіряються шляхом прямого числового розрахунку у часовому просторі сітковим методом.

Для врахування складної геометрії експериментального устаткування, що використовується для опромінення, та частотної залежності діелектричних характеристик і втрат з метою знаходження величини зростання температури під час опромінення, параметрів шаруватих структур і ґрунтів із включеннями, доцільно застосовувати числовий розрахунок полів методом кінцевих різниць у часовому просторі.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Вперше отримана система зв'язаних еволюційних рівнянь, що описує нестационарні електромагнітні поля у поперечно-неоднорідному та поздовжньо неоднорідному необмежених середовищах, розв'язання якої дає можливість концентрувати імпульсне електромагнітне поле у просторі шляхом перетворення мод, змінювати часову форму та спектральний склад хвиль для задач часової та частотної фільтрації.

Вперше одержана система нестационарних одновимірних еволюційних рівнянь в сферичній системі координат із врахуванням моди, що містить константну радіальну складову, для довільної тривимірної задачі збудження нестационарних електромагнітних хвиль у необмеженому радіально-неоднорідному середовищі. Це дозволило аналітично розв'язати задачі випромінювання джерела на сфері із довільним просторовим розподілом і довільною часовою залежністю за допомогою перетворення Лапласа.

Вперше аналітично розв'язана задача поширення нестационарної електромагнітної хвилі в слабонелінійному середовищі методом теорії збурень шляхом розрахунку просторового еквівалентного струму як функції нелінійної частини вектора поляризації. Наведена задача для моделі керівської кубічної нелінійності розв'язана виключно у часовому просторі без використання перетворення Фур'є за часовою змінною.

Вперше отримані всі компоненти випроміненого електромагнітного поля у часовому просторі для імпульсного струму з більш високою точністю для малих відстаней спостереження, ніж у класичних виразах для диполя Герца, використовуючи обмеження у вигляді малих розмірів диполя у порівнянні із просторовим часом характерної зміни збуджуючого струму, а також у порівнянні з відстанню до точки спостереження. Більш висока точність виразів була досягнута завдяки врахуванню більшої кількості членів ряду в розкладі підінтегрального виразу для векторного потенціалу. Уточнений аналітичний розв'язок для полів на відміну від класичного вперше продемонстрував коректне пояснення утворення електромагнітної хвилі із квазістатичних та індукційних складових поля в просторі поблизу випромінювача зменшенням енергії хвильової компоненти при наближенні до диполя, тоді як у класичних виразах ця складова має незмінну енергію незалежно від відстані до заданого струму.

Вперше одержані характеристики імпульсного випромінювання відкритого кінця коаксіального хвилевода із зміщеним центральним провідником, що продемонстрував задовільні характеристики випромінювання в напрямках, близьких до нормалі до площини апертури. Такий випромінювач є перспективним для використання як елемент надширококугової антенної решітки.

Вперше отримані просторові і часові характеристики імпульсного електромагнітного поля, що випромінюється рельсотронами в момент розриву потужного електричного кола для чотирьох моделей обтікання струмами поверхні снаряду. Це необхідно для виявлення роботи подібних систем і вироблення рекомендацій щодо безпеки обслуговуючого персоналу при наземному та корабельному базуванні рельсотронів з точки зору їхнього шкідливого електромагнітного випромінювання.

Вперше створений надширокосмуговий аналог вібраторно-щілинного випромінювача Клевіна, в якому шляхом сильної взаємодії надширокосмугової щілинної антени Барнса з надширокосмуговими замкненими на екран монополями у вигляді конусів досягнуто покращення напрямленості випромінювання та збільшення амплітуди імпульсів у напрямку головного максимуму в порівнянні із випромінюванням одиночної щілинної антени Барнса.

Вперше запропонована та протестована процедура корекції часової форми імпульсу, що випромінений з апертури хвилевода, за допомогою оператора поширення нестационарної електромагнітної хвилі у хвилеводі в режимі переміщення по часу назад та оператора корекції лінійних дифракційних спотворень імпульсу для формування коротких зондуючих імпульсів поля.

Вперше продемонстрований сильний вплив умов експерименту з опромінення біологічного розчину на напруженість електричного поля і коефіцієнт питомого поглинання в біологічній речовині. Проведений розрахунок полів з урахуванням низки особливостей лабораторного експерименту вперше дозволив надійно підтвердити наявність атермічної біологічної дії електромагнітного поля на живі клітини людини, більш сильний шкідливий вплив правополяризованої електромагнітної хвилі ніж лівополяризованої. Вперше за допомогою експериментальної установки, що дозволяла змінювати часову форму імпульсного сигналу, показано, що наявність суттєвої за потужністю гармонічної складової підсилює шкідливу дію поля на живі клітини людини. За допомогою розробленої та виготовленої експериментальної установки надійно визначено, що імпульсне опромінення навіть впродовж 10 секунд на рівні середньої потужності в 200 разів нижче за дозволу нормами, виробленими на основі теплової дії поля, призводить до стресового стану людських клітин.

Вперше запропонований і реалізований підхід до визначення параметрів опромінюваного шаруватого діелектрика із включеннями за відбитою імпульсною хвилею за допомогою штучної нейронної мережі, що аналізує прийняте поле в часовому просторі, причому в якості вхідних даних використовуються виключно часові відліки амплітуд, а не попередньо обраховані характеристики поля. Вперше за допомогою підходу дискретної томографії та променевого методу вироблена нова структура глибокої штучної нейронної мережі, яка характеризується кращою стійкістю класифікації, можливістю зменшення на порядок кількості нейронів без суттєвої втрати якості розпізнавання за рахунок попередньої інтелектуальної обробки інформації на основі наявних знань про фізичні процеси поширення хвиль.



Вперше створена локальна система позиціонування на штучних нейронних мережах, що аналізують прийняті імпульсні надширокосмугові поля, в якій використовується фізичне явище зміни часової форми випроміненого імпульсу для різних кутів випромінювання антени.

**Практичне значення отриманих результатів.** Завдяки одноразовому розрахунку коефіцієнтів перетворення одного типу хвиль в інший, однієї моди в іншу, вихідна тривимірна нестационарна задача зводиться до одновимірної нестационарної, що приводить до прямо пропорційного зростання часу розрахунку та обсягу оперативної пам'яті при збільшенні геометричних розмірів задач замість кубічного, що створює істотні переваги у задачах аналізу й оптимізації електродинамічних структур великих електричних розмірів. Врахування дифракційних і дисперсійних процесів дозволяє здійснити цілеспрямовану часову або частотну фільтрацію прийнятих хвиль з метою компенсації вищезгаданих спотворень інформаційних сигналів.

Комбінований числово-аналітичний підхід продемонстрував для задач з розташуванням захисного покриття на відстані у дві просторові тривалості випроміненого імпульсу економію у часі розрахунку більше ніж на три порядки, оперативної пам'яті – більше ніж на чотири порядки у порівнянні із популярним прямим числовим підходом на основі тривимірного методу кінцевих різниць у часовому просторі. Ця перевага дозволяє проводити ефективну оптимізацію параметрів імпульсних випромінюючих систем великих електричних розмірів, досягати мінімізації часових спотворень хвиль застосуванням покриттів із плавною зміною діелектричних характеристик вздовж радіусу.

Розрахунки уточнених параметрів нестационарного поля дозволяють виділити специфічні спотворення часових форм хвиль та просторового розподілу, тобто кутових модових перетворень, викликаних нелінійністю, для виявлення роботи надпотужних джерел нестационарного електромагнітного поля.

Окрім теоретичної цінності одержаних результатів, яка полягає в трактовці області ближньої зони антени та усіх об'єктів в ній як таких, що безпосередньо формують електромагнітну хвилю, отримані вирази у ближній зоні мають практичну цінність для правильного опису процесів у системах, в яких досліджуваний об'єкт розташовується в ближній зоні антени, наприклад, в радарх підповерхневого зондування, пристроях ближнього зв'язку, неруйнівного контролю, опромінення біологічних об'єктів тощо.

Одержані результати щодо нестационарного випромінювання дротяних антен є практично важливими через простоту, доступність, малу вагу та парусність таких антен, які використовуються в різних випромінюючих пристроях, наприклад, в імпульсних надширокосмугових радарних системах.

Дослідження випромінювання з апертури коаксіального хвилевода важливе для систем, що опромінюють об'єкти в своїй ближній зоні, тому що дозволяє оцінити характерний розмір області формування хвилі та дізнатися про різкий характер просторового спадання амплітуди поля. Також практичне значення має отримана залежність перехідного процесу від номера моди відбитої хвилі для формування коротких імпульсів шляхом виділення вищих мод коаксіального

хвилевода для подальшого використання для зондування, імпульсного кодування в системах цифрового зв'язку тощо.

Завдяки малим розмірам і несиметричній напрямленості коаксіальний випромінювач зі зміщеним центральним провідником може бути використаний як елемент ефективної надширокосмугової антенної решітки для випромінювання вздовж нормалі або, ще краще, під деяким кутом до неї, з широкими можливостями керування напрямком головної пелюстки і рівнем бічних.

Запропонований підхід покращення часової форми випромінених імпульсів з апертури прямокутного хвилевода придатний для використання не тільки в імпульсних антенних решітках із доступних складових традиційних вузькосмугових систем, але і для компенсації спотворень в інших випромінювачах, наприклад, рупорних, із наявними дисперсійними властивостями для застосування в надширокосмугових решітках.

Використання отриманих амплітудних і часових характеристик випромінених полів нестационарного джерела просторової конфігурації, що апроксимує обтікання струмів навколо рельсотронного снаряду, дозволяє виявляти роботу рельсотронних систем, оцінити відстань до них і їхні параметри при великих віддаленнях. Наведені дослідження ближніх полів важливі для вироблення рекомендацій щодо безпеки обслуговуючого персоналу при наземному та корабельному базуванні рельсотронів з точки зору їхнього шкідливого електромагнітного випромінювання.

Практичне значення дослідження антени Клевіна полягає в тому, що така комбінована антена як одиночна, так і як елемент решітки, ефективніше випромінює низькочастотну складову, покращує напрямленість, зберігаючи малі розміри, та більш раціонально перетворює струм в хвилю через зменшення енергії імпульсів, що відбиваються від входу антени і повертаються назад до генератора.

Отримані теоретичні результати щодо операторів поширення і компенсації дозволяють на практиці формувати необхідні для радіозондування та передачі інформації короткі імпульси навіть при використанні дисперсійних ліній передачі та наявності дифракційних процесів. Сучасні цифро-аналогові перетворювачі дозволяють шляхом синтезу часової форми струму збудження за розрахованими залежностями забезпечити необхідну часову форму випромінених імпульсів.

Проведені розрахунки нестационарних полів у структурах, необхідних для біологічних досліджень є важливими для розробки поки що відсутніх норм безпечного рівня опромінення людей імпульсними електромагнітними полями, рекомендацій щодо мінімізації їхньої шкідливої дії, в тому числі на фертильність та імунну стійкість. Практичну цінність також має описаний спосіб підвищення продуктивності ферм з вирощування ракоподібних.

Отримані результати щодо надширокосмугового зондування є критично важливими для створення новітніх імпульсних підповерхневих радарів, що виявляють і розпізнають різноманітні приховані в землі об'єкти, включаючи протипіхотні міни, в тому числі такі, які майже не мають у складі металевих деталей, що не дозволяє їх виявляти традиційними методами на основі їхніх феромагнітних властивостей. Перевагою системи позиціонування по кутам

приходу хвиль є відсутність часової синхронізації між приймачем та передавачами. Практична цінність такої системи полягає в її стійкості до випадкових чи умисних завад через використання стійких до цих чинників надширокосмугових хвиль, простота реалізації та дешевизна.

**Особистий внесок здобувача.** В роботі [1] здобувач побудував модель джерела, провів числовий розрахунок, проаналізував отримані результати.

В роботах [2, 3, 4, 6, 7, 11, 12, 13, 16] здобувач поставив задачі, обрав метод розв'язання, проаналізував отримані аналітичні та числові результати і сформулював відповідні висновки. Також в [4] автору належить ідея ілюстрації енергетичних перетворень полів, в [11] – метод зменшення небажаних осциляцій випроміненого імпульсу, в [13] – ідея використання оператора поширення для задач випромінювання та створення оператора корекції дифракційних спотворень.

Здобувач в роботах [5, 14, 15, 17, 18] провів електродинамічне моделювання експериментальної установки та умов опромінення, розрахував електромагнітні поля та їхню термічну дію, провів аналіз отриманих результатів. Додатково, в [5] запропонував початкову конструкцію експериментальної установки та параметри її оптимізації.

В роботах [8, 19, 22] поставив задачу, запропонував метод числового розрахунку для отримання часових залежностей надширокосмугових електромагнітних полів, провів аналіз результатів та сформулював висновки.

В роботах [9, 20] поставив задачу, провів аналіз результатів і сформулював висновки. Додатково в [9] запропонував метод послідовних наближень для отримання аналітичного розв'язку, а в [20] вибрав варіанти часових залежностей нестационарного джерела та запропонував ідею аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля.

В роботі [10] поставив задачу, запропонував ідею використання особливості імпульсних надширокосмугових випромінювачів для визначення положення приймальної системи в просторі, провів аналіз отриманих результатів і формулювання висновків.

В роботі [21] здобувач вибрав початкову конструкцію випромінювача у вигляді надширокосмугової щілини з провідними конусами, провів електродинамічне моделювання цього комбінованого випромінювача, дослідження ближнього поля елементарного випромінювача та аналіз отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені в дисертації результати були представлені і обговорені на міжнародних конференціях:

1. Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2002), Kharkov, Ukraine, 2002, October 1;
2. International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2002), Kiev, Ukraine, 2002, September 10-13;
3. Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (СРСА-2003), Муром, Россия, 2003, Июль 1-3;

4. IV International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2003), Sevastopol, Ukraine, 2003, September 9-12;
5. Міжнародна наукова конференція “Каразінські природознавчі студії”, Харків, Україна, 2004, Червень 14-16;
6. The Fifth International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW–04), Kharkov, Ukraine, 2004, June 21-26;
7. International Workshop Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2004), Sevastopol, Ukraine, 2004, September 19-22;
8. International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2004), Dnipropetrovsk, Ukraine, 2004, September 14-17;
9. XI-th International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2006), Kharkiv, Ukraine, 2006, June 26-29;
10. 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2006), Sevastopol, Ukraine, 2006, September 18-22;
11. Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic wave Theory (DIPED–06), Tbilisi, Georgia, 2006, October 11-13;
12. VI International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2007), Sevastopol, Ukraine, 2007, September 17-21;
13. XII International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2008), Odesa, Ukraine, 2008, June 29 – July 2;
14. 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2008), Sevastopol, Ukraine, 2008, September 15-19;
15. 3rd European Conference on Antennas and Propagation (Eucap–2009), Berlin, Germany, 2009, March 23-27;
16. VI International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2009), Lviv, Ukraine, 2009, October 6-9;
17. International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2010), Kharkov, Ukraine, 2010, June 21-26;
18. XIII International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2010), Kyiv, Ukraine, 2010, September 6-8;
19. 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2010), Sevastopol, Ukraine, 2010, September 6-10;
20. VII International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2011), Kyiv, Ukraine, 2011, September 20-23;
21. 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2012), Sevastopol, Ukraine, 2012, September 17-21;
22. XV International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2014), Dnipropetrovsk, Ukraine, 2014, August 26-28;
23. 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2014), Kharkiv, Ukraine, 2014, September 15-19;
24. 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, Ukraine, 2015, April 21-24;

25. Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic wave Theory (DIPED–15), Lviv, Ukraine, 2015, September 21-24;
26. 9th International Kharkiv Symposium On Physics And Engineering Of Microwaves, Millimeter And Submillimeter Waves (MSMW–2016), Kharkiv, Ukraine, 2016, June 21-24;
27. 16th IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2016), Lviv, Ukraine, 2016, July 5-7;
28. 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2016), Odessa, Ukraine, 2016, September 5-11;
29. IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2016), Київ, Україна, 2016б Вересень 11-15;
30. 11th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2017), Kyiv, Ukraine, 2017, May 24-27;
31. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 2017, May 29-June 2;
32. IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), Lviv, Ukraine, 2017, October 17-20;
33. IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP-2018), Lviv, Ukraine, 2018, August 21-25;
34. 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2018), Odessa, Ukraine, 2018, September 4-7;
35. Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence (ISDMCI–2019), Zaliznyi Port, Ukraine, 2019, May 21-25;
36. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON 2019), Lviv, Ukraine, 2019, July 2-6;
37. Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic wave Theory (DIPED 2019), Lviv, Ukraine, 2019, September 12-14;
38. 2019 IEEE International Scientific and Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T'2019), Kyiv, Ukraine, 2019, October 08-11;
39. 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, February 25-29;
40. Міжнародний науково-практичний семінар «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», Запоріжжя-Кропивницький, Україна, 2020, Травень 15-16;
41. IEEE XXVth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2020), Georgia, Tbilisi, 2020, September 15-18.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертації опубліковано в 1 монографії (видавництво “Springer”) та 21 статті: 11 – у зарубіжних спеціалізованих виданнях, з яких 10 входять до міжнародної наукометричної бази Scopus (1 – входить до журналу першого квартилю), 10 – у фахових виданнях України. Матеріали дисертації доповідались та опубліковані в збірниках праць 41 конференції, з яких 35 входять до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Також наукові результати додатково відображені в 3 статтях у фахових виданнях України, 1 монографії та 1 патенті України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатку. Обсяг загального тексту дисертації складає 374 сторінки, з них основного тексту 265 сторінок. Робота ілюстрована 2 таблицями та 169 рисунками. Список використаних джерел містить 275 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлена актуальність теми дисертаційної роботи, обґрунтовані напрями досліджень, наведена мета та сформульовані завдання для її досягнення. Сформульовано об'єкт, предмет дослідження, методи, наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, показаний зв'язок з науковими темами. Зазначено особистий внесок здобувача, висвітлена апробація результатів роботи на наукових конференціях та представлені публікації за темою дисертації.

**Перший розділ** присвячено огляду наявних та перспективних застосувань нестационарних електромагнітних полів, методів і підходів до вирішення актуальних практичних задач, наводяться наукові гіпотези і теорії, які потребують подальшого вивчення. Аналізується коло невирішених задач, з якого виділяються основні напрями досліджень в дисертації.

У **другому розділі** розвивається еволюційний підхід до вирішення задач поширення нестационарної хвилі у поперечно-неоднорідному та радіально-неоднорідному нестационарних середовищах. Результатом цього є отримання двох відповідних до цих задач систем еволюційних рівнянь у часовому просторі відносно амплітуд поздовжніх компонент електромагнітного поля, що є коефіцієнтами розкладу довільного поля по базисам, побудованим у поперечних площинах. Повнота цього базису гарантується теоремою Вейля про ортогональні розбиття гільбертового простору. У випадку поперечно-неоднорідного середовища еволюційні рівняння обов'язково містять коефіцієнти взаємного перетворення мод одного типу в інші. У випадку радіально-неоднорідного середовища ці рівняння розбиваються на дві незалежні системи, що описують Н- та Е-хвилі відповідно. Наведені загальні розв'язки цих рівнянь, які отримані шляхом застосування перетворення Лапласа. Ефективність і універсальність застосованого підходу проілюстрована на задачі випромінювання електромагнітної хвилі малою петлею, збуджуваною гауссовим імпульсом електричного струму, за додаткової умови, що петля охоплена сферичним покриттям з радіально-неоднорідного діелектрика з гауссівським розподілом діелектричної проникності. Часова залежність для точки спостереження, яка знаходиться всередині цієї сфери радіусу 0,6 м наведена на Рис. 1. На ньому добре видно хвилі, що прийшли від петлі ( $ct=0,17$  м), відбиті від сферичного шару один раз ( $ct=1$  м, відбиття від протилежної сторони  $ct=1,4$  м) та два рази ( $ct=2,3$  м). Тут еволюційні рівняння розв'язані суто числовим одновимірним методом кінцевих різниць у часовому просторі – FDTD (1), тривимірним числовим методом (2) та їхньою комбінацією (3), коли тривимірний метод дає змогу швидко

отримати спотворення збуджуваного струму, аналізуючи малий розрахунковий об'єм, а одновимірний, використовуючи виправлену часову форму струму, дозволяє швидко розраховувати задачі великих електричних розмірів, заощаджуючи на 3-4 порядки час розрахунку і обсяг оперативної пам'яті.

**Другий розділ** присвячено використанню методу еволюційних рівнянь та теорії збурень для отримання аналітичного розв'язку задачі поширення нестационарної електромагнітної хвилі в слабонелінійному середовищі шляхом розрахунку просторового еквівалентного струму, що є функцією нелінійної частини вектора поляризації,

$$\vec{J}' = \frac{\partial}{\partial t} \vec{P}'(\vec{E}),$$

коли в якості прикладу вибрана модель керівської кубічної нелінійності без врахування інерційності середовища

$$\vec{P}'(\vec{E}) = \varepsilon_0 \chi_3 \vec{E}^3.$$

Задача розв'язується виключно у часовому просторі без використання перетворення Фур'є за часовою змінною. Описується ітеративна процедура для одержання подальших нелінійних поправок до отриманих аналітичних виразів для амплітуд полів.

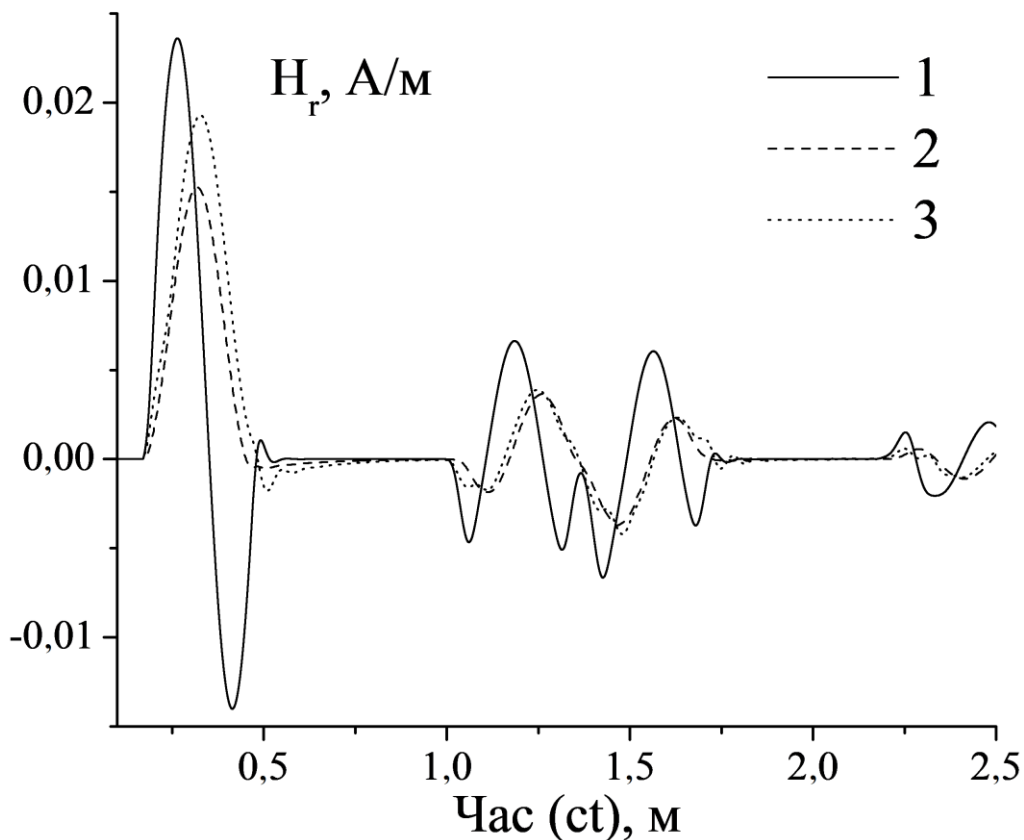


Рис. 1 Часова залежність амплітуди радіальної компоненти магнітного поля всередині діелектричної сфери (1 – числовий розв'язок для заданого струму зовнішнього джерела (1D FDTD метод), 2 – тривимірний числовий розв'язок (3D FDTD метод), 3 – числовий розв'язок для заданого струму, розрахованого із врахуванням індукованих струмів (1D FDTD))

Для оптимізації числового розрахунку нелінійної складової проведений аналіз просторової локалізації нестационарного поля шляхом обмеження розрахункового об'єму тими областями, де найвищі амплітудні значення електричної компоненти поля, саме які і продукують найвагомий внесок у результуючу нелінійну поправку. Типовий розподіл цього вторинного струму в циліндричній системі координат для випадку збудження кругової апертури однонапрямленим струмом із ступінчастою залежністю від часу наведений на Рис. 2.

Розрахунки уточнених значень нестационарного поля дозволяють виділити специфічні спотворення просторового розподілу, тобто кутових модових перетворень, викликаних нелінійністю, та часових форм хвиль, як це представлено на Рис. 3 для збудження джерела рівномірно розподіленого струму у вигляді диску одиничним стрибком. Тут одночасно представлена лінійна частина поля і нелінійний доданок до розв'язку.

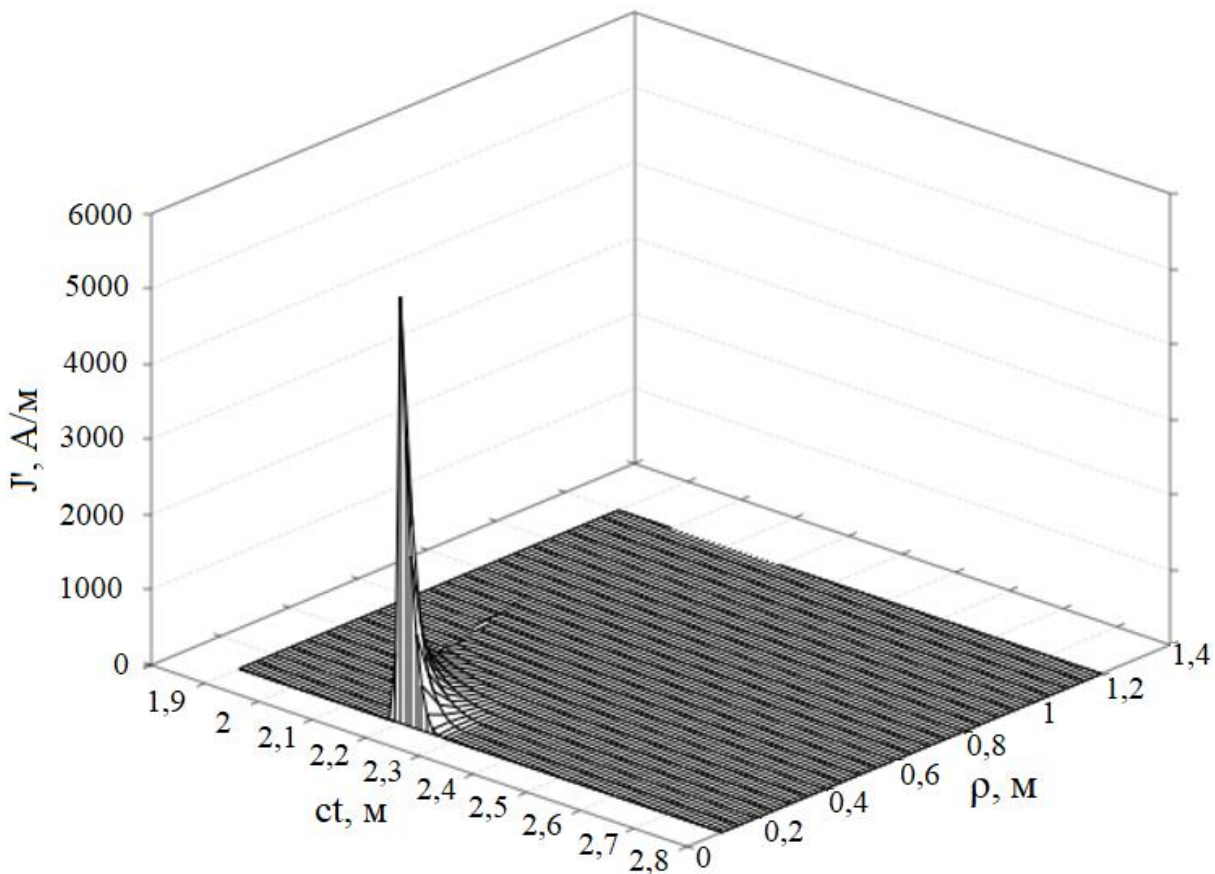


Рис. 2 Типова часова та просторова залежність амплітуди густини вторинного струму, породженого нелінійним середовищем

У **третьому розділі** розглядаються енергетичні перетворення нестационарних полів у ближній зоні випромінювачів. Використовуючи обмеження у вигляді малих розмірів диполя у порівнянні із просторовим часом характерної зміни збуджуючого струму, а також у порівнянні з відстанню до точки спостереження, отримані всі компоненти випроміненого електромагнітного поля у



часовому просторі для імпульсного струму з більш високою точністю для малих відстаней спостереження ніж у класичних виразах, як наприклад для поперечної електричної компоненти:

$$E_{\theta} = \frac{l \sin \theta}{4\pi\epsilon_0} \times \left( e_{\theta 0} \frac{Q}{r^3} + e_{\theta 1} \frac{\dot{Q}}{cr^2} + e_{\theta 2} \frac{\ddot{Q}}{rc^2} + e_{\theta 3} \frac{\ddot{\ddot{Q}}}{r^2 c^3} + e_{\theta 4} \frac{\ddot{\ddot{\ddot{Q}}}}{rc^4} \right);$$

$$e_{\theta 0} = 1 - \frac{6r_d^2 + l^2}{8r^2} + \left( \frac{13l^2}{8r^2} - \frac{15r_d^2}{4r^2} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{15r_d^2}{8r^2} - \frac{l^2}{4r^2} \right) \sin^2 \theta;$$

$$e_{\theta 1} = 1 - \frac{3r_d^2}{4r^2} - \frac{l^2}{8r^2} + \left( \frac{13l^2}{8r^2} - \frac{7r_d^2}{4r^2} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{7r_d^2}{8r^2} - \frac{l^2}{4r^2} \right) \sin^2 \theta;$$

$$e_{\theta 2} = 1 - \frac{r_d^2}{2r^2} - \frac{l^2}{12r^2} + \left( \frac{19l^2}{24r^2} - \frac{3r_d^2}{2r^2} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{9r_d^2}{8r^2} - \frac{l^2}{12r^2} \right) \sin^2 \theta;$$

$$e_{\theta 3} = \frac{l^2 - r_d^2}{4} \cos^2 \theta + \frac{5r_d^2 \sin^2 \theta}{8} - \frac{r_d^2}{4} - \frac{l^2}{24};$$

$$e_{\theta 4} = \frac{l^2}{24} \cos^2 \theta + \frac{r_d^2}{8} \sin^2 \theta,$$

де  $l$  – довжина диполя,  $r_d$  – радіус диполя,  $Q \equiv Q(t - r/c)$  – часова залежність заряду.

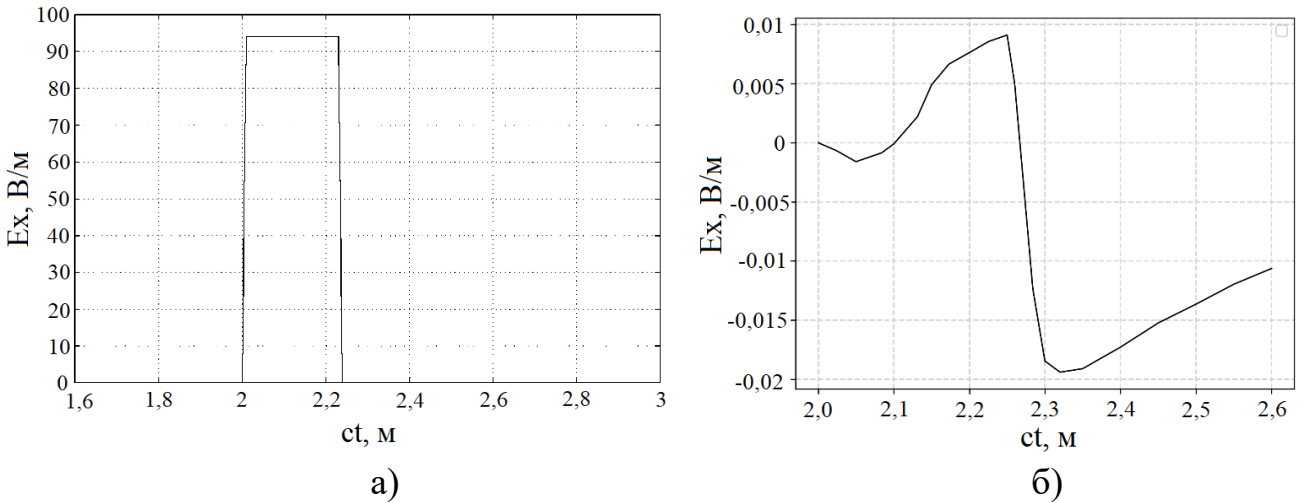


Рис. 3 Лінійний розв'язок для електричного поля на поздовжній осі плоского диску, що збуджений одиночним стрибком струму (а), та нелінійний доданок до поперечної компоненти електричного поля плоского диску на поздовжній осі (б)

Підвищена точність отриманих виразів була досягнута завдяки врахуванню більшої кількості членів ряду в розкладі підінтегрального виразу для векторного потенціалу та скінченності довжини і товщини диполя. Порівняння отриманого

уточненого розв'язку для векторного потенціалу та усіх компонент поля із класичним і точним, розрахованим числовим методом, показало кращу узгодженість уточненого розв'язку з точним для близьких відстаней спостереження. Уточнений аналітичний розв'язок для полів, на відміну від класичного, вперше продемонстрував коректне пояснення утворення електромагнітної хвилі із квазістатичних та індукційних складових поля в просторі поблизу випромінювача зменшення енергії хвильової компоненти при наближенні до диполя, тоді як у класичних виразах ця складова має незмінну енергію незалежно від відстані до області заданого струму. Аналізуючи часозалежний критерій дальньої зони для надширокосмугового поля, що був наведений Хармутом на основі порівняння амплітуд хвильової та індукційної складових поля, вперше запропонований енергетичний критерій, в якому порівнюються енергія хвильової складової магнітного поля з його повною енергією. Приклад такого відношення енергій від відстані спостереження під кутом  $\theta = \pi/4$  до поздовжньої осі диполя наведений на Рис. 4 для вмикання електричного струму з характерним часом перехідного процесу 1 нс.

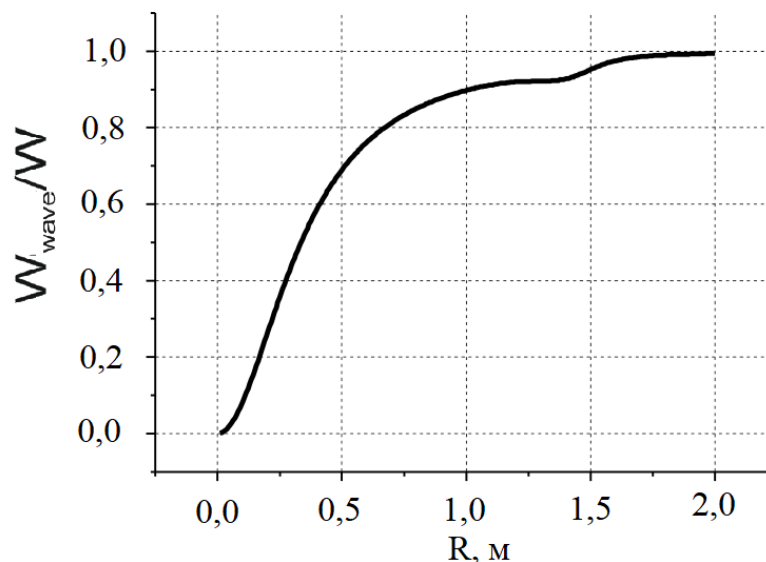


Рис. 4 Відношення енергії хвильової компоненти магнітного поля до сумарної енергії магнітного поля в точці спостереження, віддаленої від випромінювача на відстань  $R$ , для кута  $\theta = \pi/4$

Задача випромінювання нестационарних електромагнітних полів тонким вертикальним вібратором над нескінченним ідеальнопровідним екраном була розв'язана у часовому просторі у наближенні заданого струму, аналітичний вираз для якого було отримано базуючись на моделі хвилі струму, що біжить вздовж довгої лінії, де експоненційне зменшення її амплітуди через втрати на випромінювання було розраховано з експериментальних даних, отриманих іншими авторами. Типові часові залежності прийнятого поперечного електричного поля на великих відстанях для різних кутів спостереження, що

відраховуються від площини екрану, зображені на Рис. 5. Часова форма струму джерела має форму гауссіана з тривалістю 2 нс за рівнем  $1/e$ .

У часовому просторі на основі аналітичного розв'язку задачі дифракції нестационарної Т-хвилі зі ступінчастою часовою залежністю на відкритому кінці коаксіального хвильовода проведений аналіз енергетичних перетворень полів у ближній зоні цього випромінювача. Отримано, що тільки 11 % відсотків від енергії падаючої хвилі перетворюється на випромінену хвилю, 16 % – у хвильоводні Е-хвилі, а 73 % – в електростатичне поле.

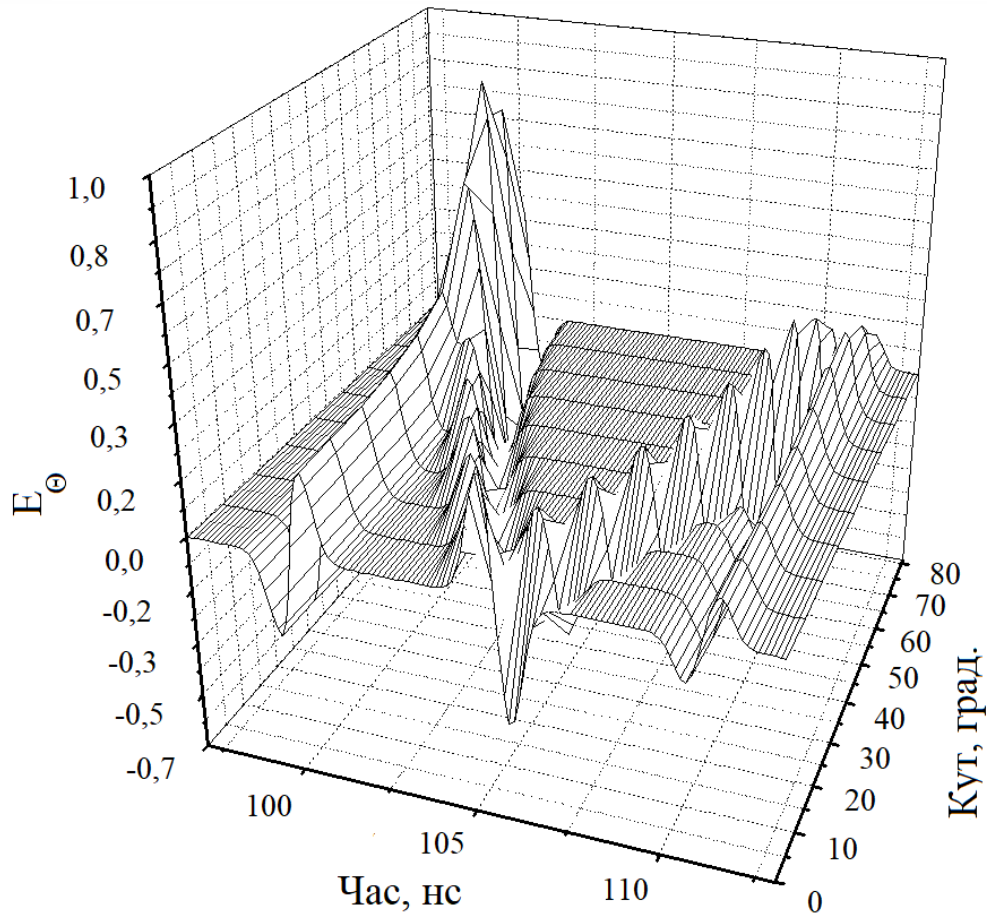


Рис. 5 Нормовані залежності амплітуди поперечної електричної компоненти поля від часу та кута  $\varphi$  для вібратора довжиною  $L=1,64$  м і відстані спостереження  $R=30$  м

Досліджена в імпульсному режимі випромінююча структура у вигляді коаксіального хвильовода із зміщеним центральним провідником та отримані задовільні характеристики випромінювання у напрямках, близьких до нормалі до площини апертури. Завдяки малим розмірам і несиметричній напрямленості подібний випромінювач може бути використаний як елемент ефективної надширококутної антенної решітки для випромінювання вздовж нормалі або, ще краще, під деяким кутом до неї, з широкими можливостями керування напрямком головної пелюстки і рівнем бічних.

На основі еволюційного підходу до задачі поширення електромагнітної хвилі в хвильоводах досліджена природа виникнення характерних дисперсійних спотворень коротких імпульсів на прикладі прямокутного хвильовода та їхній вплив на випромінювання з його відкритого кінця. Вивчений вплив просторового розподілу джерела збуджуючого струму всередині хвильовода на величину цих спотворень у випроміненій хвилі.

Отримані характеристики імпульсного електромагнітного поля, що випромінюється рельсотронами в момент розриву потужного електричного кола на основі чотирьох моделей: диполя Герца, двох паралельних диполів, чотирьох диполів, що формують ромб, та шести диполів, що формують шестикутник. Останні три моделі застосовані для більш коректного опису процесу обтікання струмами поверхні снаряду. На основі аналізу часової форми випроміненого поля визначена ближня границя дальньої зони такого випромінювача.

Створений надширокосмуговий аналог вібраторно-щілинного випромінювача Клевіна (див. Рис. 6), в якому шляхом сильної взаємодії надширокосмугової щілинної антени Барнса з надширокосмуговими замкненими на екран монополями у вигляді конусів досягнуто покращення напрямленості випромінювання та збільшення амплітуди імпульсів в напрямку головного максимуму в порівнянні із випромінюванням щілинної антени Барнса. Така комбінована антена ефективніше випромінює низькочастотну складову, покращує напрямленість, зберігаючи малі розміри, та більш ефективно випромінює через зменшення енергії імпульсів, що відбиваються від входу антени і повертаються назад до генератора.

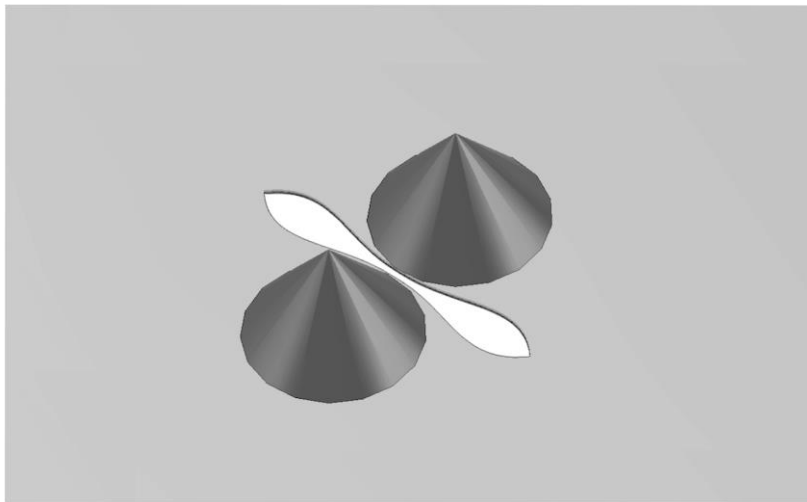


Рис. 6 Надширокосмуговий аналог випромінювача Клевіна

Запропонована і протестована процедура корекції часової форми імпульсу, випроміненого з апертури хвильовода довільного однозв'язного поперечного перетину, за допомогою використання оператора поширення нестационарної електромагнітної хвилі у хвильоводі в режимі переміщення по часу назад та оператора корекції довільних лінійних дифракційних спотворень імпульсу, наприклад, на випромінюючій апертурі. Використовуючи поширення лягеррівського імпульсу, показана можливість формування короткого імпульсу в

системі із сильною дисперсією шляхом збудження в хвилеводі складових, що повністю компенсують дисперсійні спотворення в заданому перетині, як проілюстровано на Рис. 7, де  $k$  – поперечне хвильове число.

Проведена числова симуляція показала, що через дифракцію нестационарної хвилі на відкритому кінці хвилевода випромінена хвиля має небажані додаткові коливання, для компенсації яких побудований ще один оператор, який мінімізує ці спотворення шляхом додаткової зміни часової залежності джерела, як представлено на Рис. 8, де  $f(t)$  – поле збудження в заданому перетині,  $F(t)$  – поле на апертурі, індекс «new» позначає застосування оператора корекції дифракційних спотворень. Успішність цієї мінімізації тим вища, чим менше співвідношення амплітуд спотворюючих складових до амплітуди корисної складової.

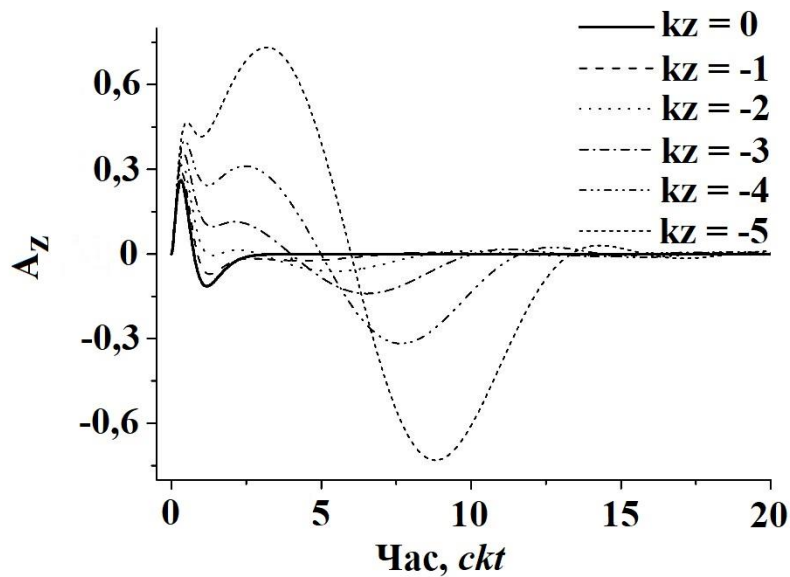


Рис. 7 Перетворення часової форми амплітуди поздовжньої компоненти хвилі у хвилеводі в короткий лягеррівський імпульс для безрозмірного часу та координати

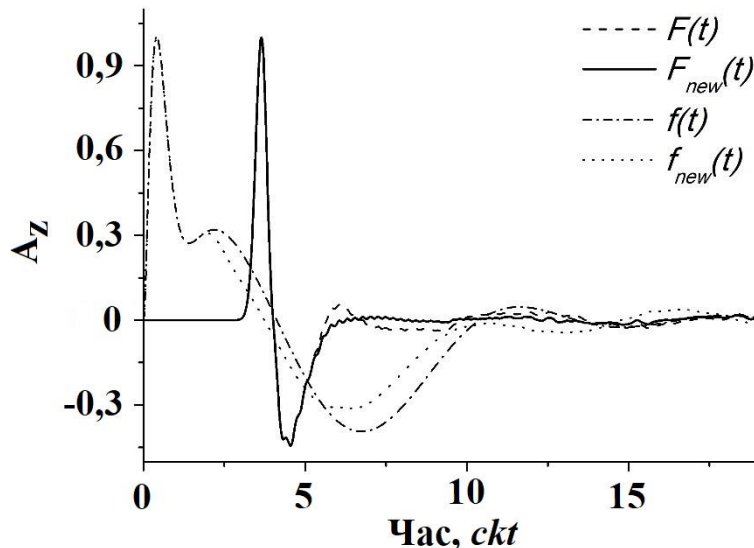


Рис. 8 Нормовані амплітуди поздовжньої компоненти: початкові та виправлені («new») збуджуючі поля ( $f(t)$ ) та поля на апертурі ( $F(t)$ )

У **п'ятому розділі** досліджуються нестационарні електромагнітні поля у біологічних середовищах. Шляхом числового моделювання процесу опромінення біологічного розчину продемонстрований сильний вплив умов експерименту, конструкції та розмірів експериментальної установки на напруженість електричного поля і питомий коефіцієнт поглинання в біологічній речовині. Це показано на прикладі впливу товщини предметного скла (див. Рис. 9) та впливу товщини дерев'яної дошки під предметним склом (див. Рис. 10) на питомий коефіцієнт поглинання для двох моделей краплі розчину.

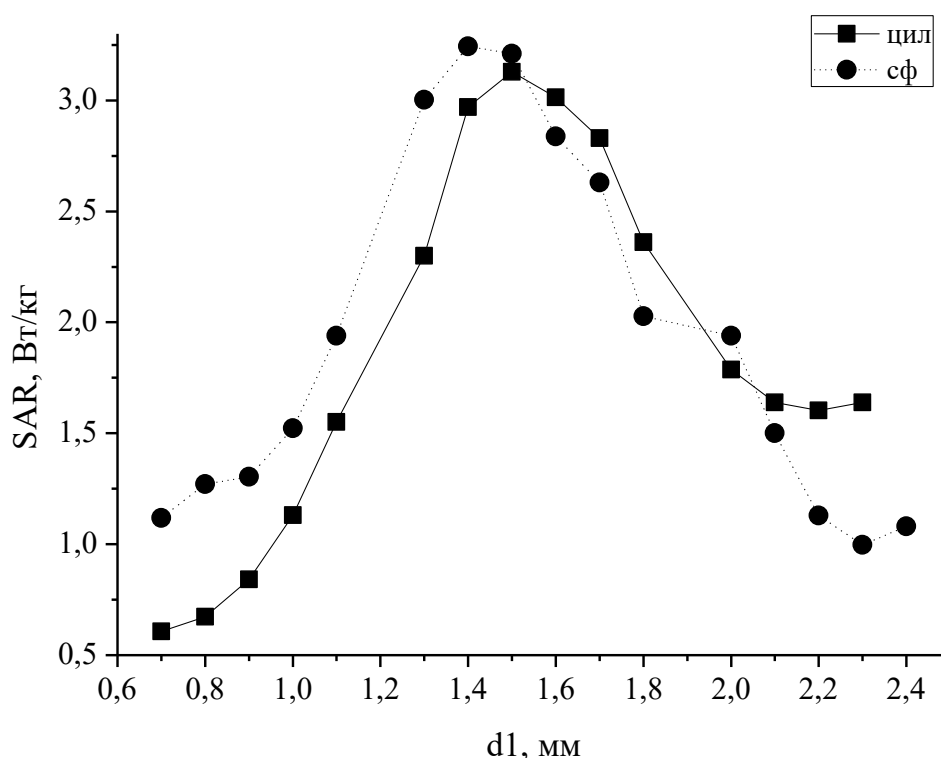


Рис. 9 Залежність питомого коефіцієнту поглинання (SAR) від товщини предметного скла для двох моделей краплі: циліндра та напівсфери

Виявлено, що опромінювання розчину на склі характеризується тим, що зі зростанням частоти до 15 ГГц коефіцієнт питомого поглинання значно зростає, а потім має осцилюючий характер. Проведений розрахунок полів з урахуванням низки особливостей лабораторного експерименту дозволив надійно підтвердити наявність атермічної біологічної дії електромагнітного поля на живі клітини людини, більш сильний шкідливий вплив правополяризованої електромагнітної хвилі ніж лівополяризованої. Моделювання опромінювання яєць дрозофіл дало можливість зробити висновок, що зменшення кількості вилуплених комах не може бути пов'язано з нагрівом яєць, а є наслідком високої чутливості цих організмів до слабких електромагнітних полів. Розрахунок теплової дії змінного магнітного поля всередині яєць Артемії дав можливість стверджувати, що суттєве збільшення

відсотку вилуплених яєць не може бути пов'язане з підвищенням температури, а є наслідком суто неспецифічної дії поля.

За допомогою експериментальної установки, що дозволяла змінювати часову форму імпульсного сигналу, показано, що наявність суттєвої за потужністю гармонічної складової значно підсилює шкідливу дію поля на живі клітини людини. Створена оптимізована експериментальна установка для надширококутового опромінення біологічних розчинів, яка забезпечує заданий рівень опромінення та задовільну рівномірність поля всередині розчину, що розміщений в стандартній пластиковій пробірці, як показано на Рис. 11.

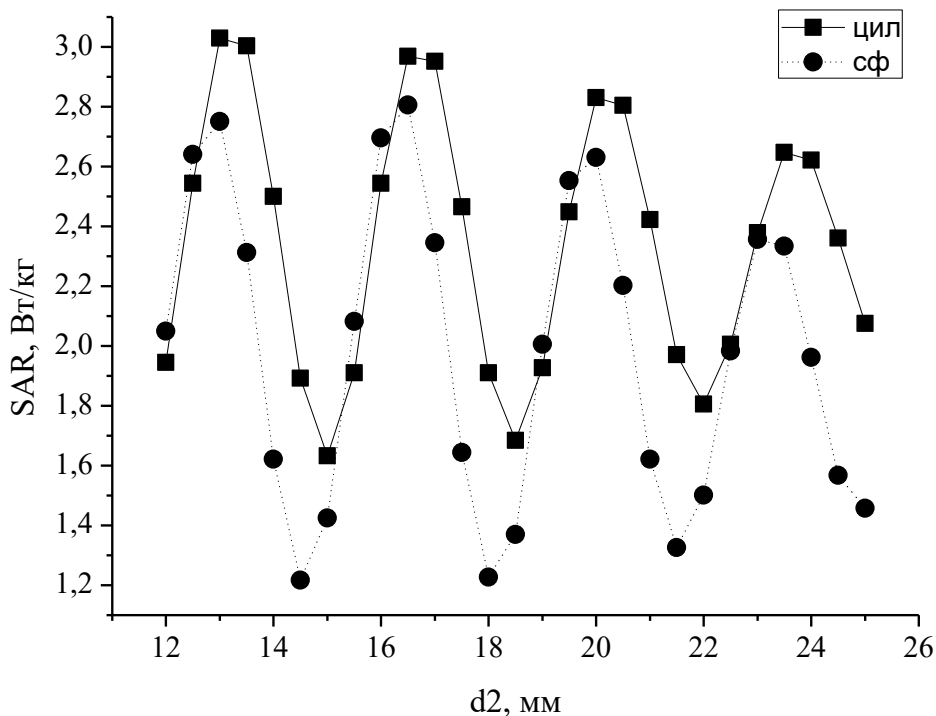


Рис. 10 Залежність питомого коефіцієнта поглинання від товщини дерев'яної дошки під предметним склом для двох моделей краплі: циліндра та напівсфери

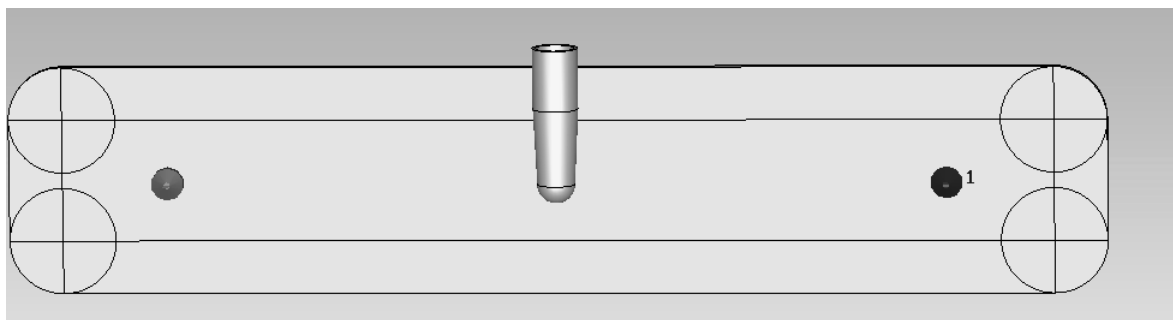


Рис. 11 Форма пластин опромінювача після оптимізації

Ця установка забезпечила стабільність питомого коефіцієнта поглинання, що проілюстровано на Рис. 12. За її допомоги надійно визначено, що імпульсне опромінення навіть продовж 10 секунд на рівні потужності в 200 разів нижче за дозволу європейськими нормами, при їх перерахунку в теплову дію, призводить до стресового стану людських клітин, за яких вони не можуть нормально

функціонувати, але збільшення часу опромінення приводить до періодичної зміни станів стресу та релаксації.

В шостому розділі наведені результати дослідження положення наземних і прихованих об'єктів, параметрів шаруватих середовищ за допомогою опромінення імпульсними полями та аналізу відбитого чи прийнятого поля штучними нейронними мережами. Запропонований і реалізований підхід до визначення товщини діелектрика в шаруватій структурі із відомими електричними параметрами за відбитою імпульсною хвилею за допомогою штучної нейронної мережі, що аналізує прийняте поле в часовому просторі, тобто, в якості вхідних даних використовуються виключно часові відліки амплітуд, а не якісь попередньо обраховані характеристики поля. Цей підхід виділяється високою чутливістю, швидкістю, здатністю правильно апроксимувати проміжні випадки, стійкістю до шумів та помилок у вхідних даних, яка, як показано, у згорткової нейронної мережі вище. Подібні задачі є важливими при неруйнівному контролі та дослідженні біологічних об'єктів.

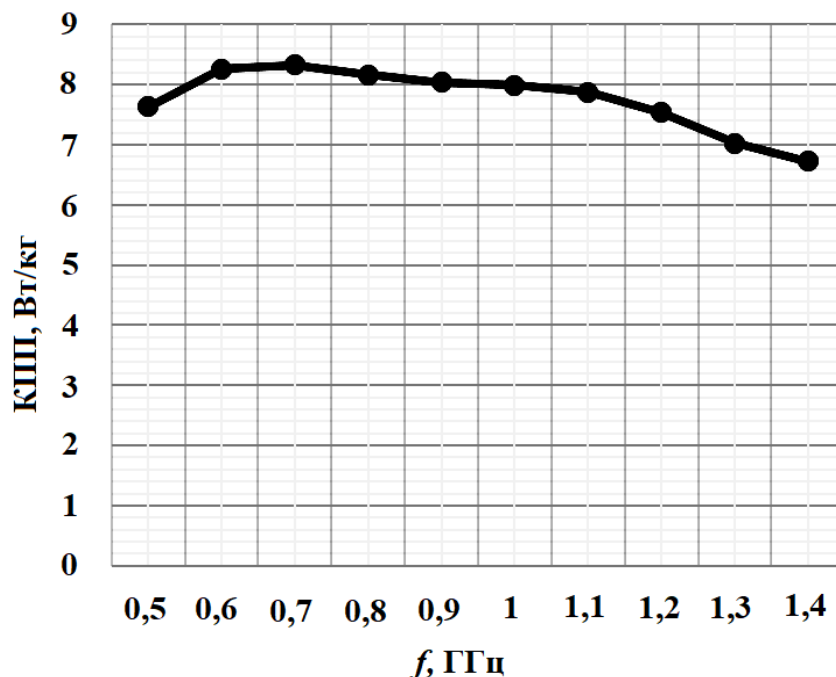


Рис. 12 Коефіцієнт питомого поглинання (SAR) для всієї краплі як функція частоти при збудженні системи гауссовим імпульсом напруги одиничної амплітуди наносекундної тривалості

Побудовані глибокі штучні нейронні мережі для виявлення заданого металевих об'єкту (труби) під землею поверхнею і визначення глибини його залягання при опроміненні імпульсною плоскою хвилею, причому з'ясовано шляхом аналізу інформаційної наповненості мереж, що друга задача є більш складною, як це видно зі значень вагових коефіцієнтів першого прихованого шару мережі, які наведені на Рис. 13. В обох випадках аналізувалися часові залежності амплітуди полів у 15 точках, і задача виявлення труби була розв'язана нейронною мережею шляхом застосування однакового алгоритму обробки сигналів в усіх 15



точках, що показують коефіцієнти на Рис. 13а. В той же час, для визначення глибини залягання труби аналізом сигналів в тих же ж 15 точках нейронна мережа винайшла в процесі навчання для кожної з них свій алгоритм обробки, як представлено на Рис. 13б.

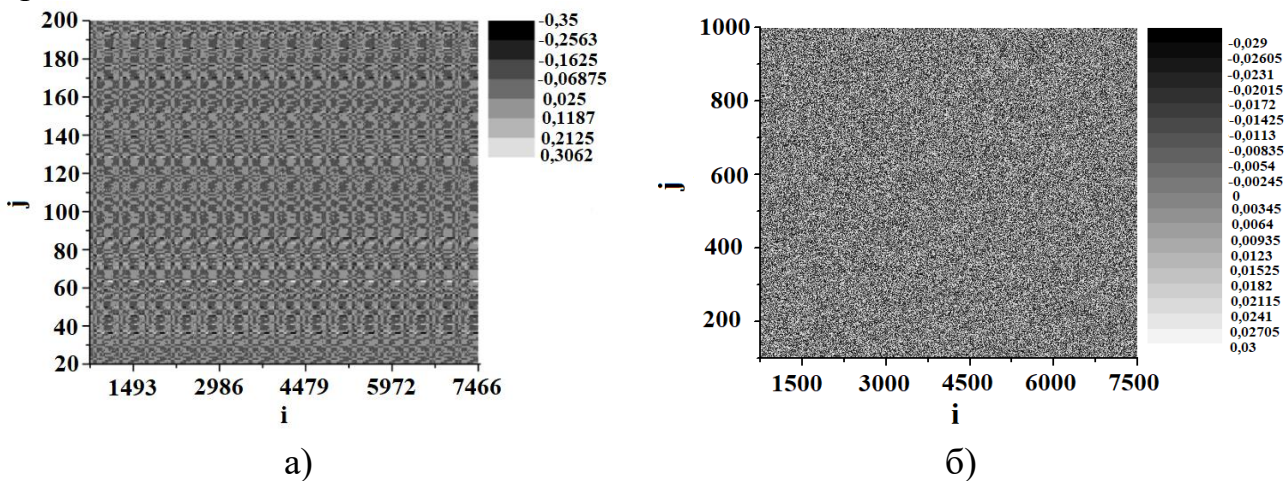


Рис. 13 Значення вагових коефіцієнтів між  $i$  та  $j$  нейронами першого та другого шарів (а) для задачі виявлення труби,  $i$  та  $j$  нейронами першого та другого шарів (б) для задачі визначення глибини розташування труби

За допомогою підходу дискретної томографії та променевого методу вироблена нова структура глибокої ШНМ з додатковими вхідними даними, обчисленими із звичайного набору вхідних даних, яка характеризується кращою стійкістю, можливістю зменшення на порядок кількості нейронів без суттєвої втрати якості розпізнавання за рахунок попередньої інтелектуальної обробки інформації на основі наявних знань про фізичні процеси поширення електромагнітної хвилі у середовищі. Показано, що застосування майже точкового опромінювання, реалізованого імпульсною антеною типу «метелик», демонструє хорошу стабільність визначення відстані до об'єкта за наявності шумів і у випадку поперечного зсуву об'єкта. Стійкість по відношенню до адитивних шумів проілюстрована на Рис. 14 для випадку металевого циліндру з радіусом 55 мм і висотою 53 мм, розміщеного на відстані 100 мм і глибині 30 мм. Нейронна мережа була натренована на 6 варіантів відстаней до приймальної системи з кроком 50 мм. Рівень шуму визначався за відношенням енергії прийнятого імпульсу до енергії адитивного шуму, в якості якого вибрана модель білого шуму. З Рис. 14 видно, що до величини співвідношення сигналу до шуму (ССШ) у 8,4 дБ штучна нейронна мережа правильно класифікує положення об'єкта. І навіть при рівні шумів, який відповідає ССШ у 6,4 дБ, похибка класифікації не перевищує мінімального кроку, на який навчалась штучна нейронна мережа.

Вперше запропонована локальна система позиціонування на імпульсних надширокосмугових полях і нейронних мережах, в якій використовується фізичне явище зміни форми випроміненого імпульсу для різних кутів випромінювання антени. Перевагою такою системи позиціонування на площині по кутам приходу хвиль від двох антен є відсутність часової синхронізації між приймачем та передавачами. Точність визначення положення проілюстрована на Рис. 15, де

наведена найскладніша для нейронної мережі комбінація кутів випромінювання двох антен.

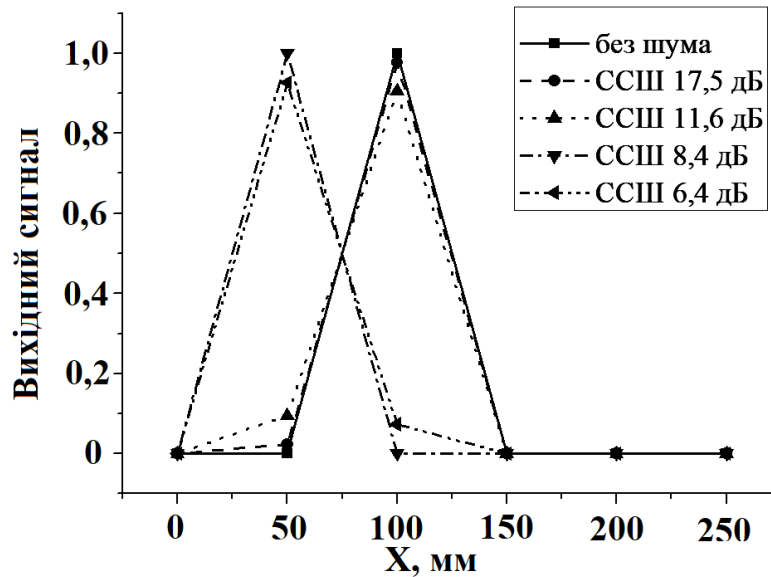


Рис. 14 Залежність вихідних сигналів штучної нейронної мережі від відстані до металевого об'єкта для різних рівнів шуму сигналів (ССШ) для випадку реальної відстані до об'єкта 100 мм

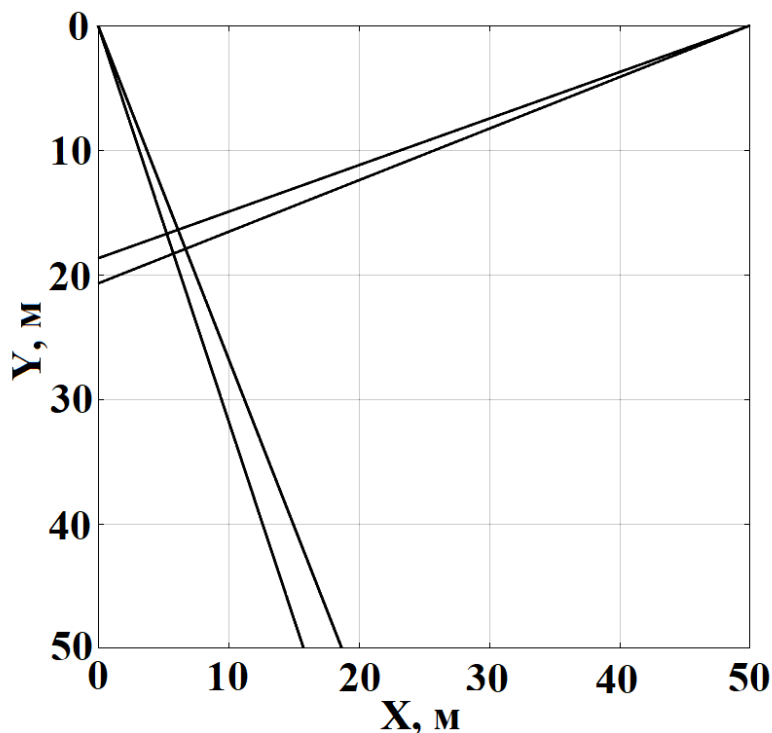


Рис. 15 Невизначеність положення приймача для однієї з найгірших комбінацій кутів ( $\theta_1 = 18$  град.,  $\theta_2 = 68$  град.)

У **Висновках** наведені основні результати дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова проблема розвитку еволюційного підходу до задач випромінювання нестационарних електромагнітних хвиль, удосконалення методів розрахунку надширокосмугових полів у нелінійних, неоднорідних, нестационарних і біологічних середовищах, покращення характеристик надширокосмугових випромінювачів, застосування імпульсних хвиль для підповерхневого зондування, визначення положення та розпізнавання прихованих об'єктів.

У дисертації створено новий науковий напрямок дослідження явищ випромінювання нестационарних електромагнітних хвиль у часовому просторі за допомогою еволюційного підходу, коли поширення хвиль відбувається у нелінійних, неоднорідних, нестационарних і біологічних середовищах. Вперше отримана система зв'язаних еволюційних рівнянь, що описує нестационарні електромагнітні поля у поперечно-неоднорідному та поздовжньо неоднорідному необмеженому середовищі та дає можливість концентрувати імпульсне електромагнітне поле у просторі шляхом перетворення мод, змінювати часову форму і спектральний склад цих хвиль для вирішення задач часової та частотної фільтрації. Завдяки одноразовому розрахунку коефіцієнтів перетворення одного типу хвиль в інший, однієї моди в іншу, вихідна тривимірна нестационарна задача зводиться до одновимірної нестационарної, що приводить до прямопропорційного зростання часу розрахунку і обсягу оперативної пам'яті при збільшенні лінійних геометричних розмірів задач замість кубічного, що створює істотні переваги у задачах аналізу та оптимізації згаданих електродинамічних структур.

Вперше довільна тривимірна задача збудження нестационарних електромагнітних хвиль у необмеженому радіально-неоднорідному середовищі зведена до системи нестационарних одновимірних еволюційних рівнянь в сферичній системі координат із врахуванням моди, що містить константну радіальну складову. Це дозволило аналітично розв'язати у часовому просторі задачі випромінювання джерела на сфері із довільним просторовим розподілом і довільною часовою залежністю за допомогою перетворення Лапласа, продемонструвати для задачі з розташуванням захисного покриття антени на відстані у дві просторові тривалості випроміненого імпульсу економію у часі розрахунку більше ніж на три порядки, оперативної пам'яті – більше ніж на чотири порядки у порівнянні із популярним прямим числовим підходом на основі тривимірного методу кінцевих різниць у часовому просторі. Ця перевага дозволяє проводити ефективну оптимізацію параметрів імпульсних випромінюючих систем великих електричних розмірів, досягати мінімізації часових спотворень хвиль застосуванням покриттів із плавною зміною діелектричних характеристик вздовж радіусу.

Вперше запропоновано використання методу теорії збурень для отримання аналітичного розв'язку задачі поширення нестационарної електромагнітної хвилі в слабонелінійному середовищі шляхом розрахунку просторового еквівалентного струму через нелінійну частину вектора поляризації, описана ітеративна процедура для одержання подальших нелінійних поправок до отриманих значень

амплітуд полів. Розрахунки уточнених значень нестационарного поля дозволяють виділити специфічні спотворення часових форм хвиль та просторового розподілу, тобто кутових модових перетворень, викликаних нелінійністю, для виявлення роботи надпотужних джерел нестационарного електромагнітного поля.

Використовуючи обмеження у вигляді малих розмірів диполя у порівнянні із просторовим часом характерної зміни збуджуючого струму, а також у порівнянні з відстанню до точки спостереження, вперше отримані всі компоненти випроміненого електромагнітного поля у часовому просторі для імпульсного струму з більш високою точністю для малих відстаней спостереження, ніж у класичних виразах. Уточнений аналітичний розв'язок для полів, на відміну від класичного для диполя Герца, вперше продемонстрував коректне пояснення утворення електромагнітної хвилі із квазістатичних та індукційних складових поля в просторі поблизу випромінювача зменшенням енергії хвильової компоненти при наближенні до диполя, тоді як у класичних виразах ця складова має незмінну енергію незалежно від відстані до області заданого струму. Аналізуючи часозалежний критерій границі дальньої зони для надширокосмугового поля, що був наведений Хармутом на основі порівняння амплітуд хвильової та індукційної складових поля, вперше запропонований енергетичний критерій, в якому порівнюються енергія хвильової складової магнітного поля з його повною енергією. Окрім теоретичної цінності одержаних результатів, яка полягає в трактовці області ближньої зони антени та усіх об'єктів в ній як таких, що безпосередньо формують електромагнітну хвилю, отримані вирази мають практичну цінність для правильного опису процесів в системах, в яких досліджуваний об'єкт розташовується в ближній зоні антени, наприклад, в радарх підповерхневого зондування, пристроях ближнього зв'язку, неруйнівного контролю, опромінення біологічних об'єктів тощо.

Одержання статичного поля на розкритті хвилевода, збудженого одиничним стрибком амплітуди падаючої Т-хвилі, вперше дозволило перевірити із прийнятною точністю виконання закону збереження енергії при випромінюванні та продемонструвати, що лише невелика частина її, а саме 11 %, перетворюється у випромінену хвилю. Проведене дослідження важливе для антен, що опромінюють об'єкти в ближній зоні, тому що дозволяє оцінити характерний розмір області формування хвилі та пояснити різкий характер спадання амплітуди поля в цій області.

Вперше досліджена в імпульсному режимі випромінююча структура у вигляді коаксіального хвилевода із зміщеним центральним провідником і отримані задовільні характеристики випромінювання у напрямках, близьких до нормалі до площини апертури. Завдяки малим розмірам і несиметричній напрямленості подібний випромінювач може бути використаний як елемент ефективної надширокосмугової антенної решітки для випромінювання вздовж нормалі або, ще краще, під деяким кутом до неї, з широкими можливостями керування напрямком головної пелюстки і рівнем бічних.

Вперше отримані характеристики імпульсного електромагнітного поля, що випромінюється рельсотронами в момент розриву потужного електричного кола

для чотирьох моделей обтікання струмами поверхні снаряду. Вперше одержано, що подібні системи формують електромагнітну хвилю на відстанях порядку ста кілометрів. Використання отриманих амплітудних і часових характеристик випромінених полів дозволяє виявляти роботу подібних систем, оцінити відстань до них і їхні параметри при великих віддаленнях. Наведені дослідження ближніх полів важливі для вироблення рекомендацій щодо безпеки обслуговуючого персоналу при наземному та корабельному базуванні рельсотронів з точки зору їхнього шкідливого електромагнітного випромінювання.

Вперше створений надширокосмуговий аналог вібраторно-щілинного випромінювача Клевіна, в якому шляхом сильної взаємодії надширокосмугової щілинної антени Барнса з надширокосмуговими замкненими на екран монополями у вигляді конусів досягнуто покращення напрямленості випромінювання та збільшення амплітуди імпульсів в напрямку головного максимуму в порівнянні із випромінюванням щілинної антени Барнса. Практичне значення цього дослідження полягає в тому, що така комбінована антена як одиночна, так і як елемент решітки, ефективніше випромінює низькочастотну складову, покращує напрямленість, зберігаючи малі розміри, та більш раціонально перетворює струм в хвилю через зменшення енергії імпульсів, що відбиваються від входу антени і повертаються назад до генератора.

Вперше запропонована і протестована процедура корекції часової форми імпульсу, випроміненого з апертури, за допомогою використання оператора поширення нестационарної електромагнітної хвилі в режимі переміщення по часу назад та оператора корекції довільних лінійних дифракційних спотворень імпульсу. Для лягеррівського імпульсу показана можливість формування короткого імпульсу в системі із сильною дисперсією шляхом збудження в хвилеводі складових, що повністю компенсують дисперсійні спотворення в заданому перетині. Отримані теоретичні результати дозволяють на практиці формувати необхідні для радіозондування та передачі інформації короткі імпульси навіть при використанні дисперсійних ліній передачі та наявності дифракційних процесів шляхом збудження таких пристроїв джерелами, в яких розраховані часові залежності синтезуються сучасними цифро-аналоговими перетворювачами.

Шляхом числового моделювання процесу опромінення біологічного розчину вперше продемонстрований сильний вплив умов експерименту, конструкції та розмірів експериментальної установки на напруженість електричного поля і коефіцієнт питомого поглинання в біологічній речовині. Вперше виявлено, що таке опромінювання розчину на предметному склі характеризується тим, що зі зростанням частоти до 15 ГГц коефіцієнт питомого поглинання значно зростає, а потім має осцилюючий характер. Вперше за допомогою експериментальної установки, що дозволяла змінювати часову форму імпульсного сигналу, показано, що наявність суттєвої за потужністю гармонічної складової значно підсилює шкідливу дію поля на живі клітини людини. Вперше створена оптимізована експериментальна установка для надширокосмугового опромінення біологічних розчинів, яка забезпечує заданий рівень опромінення та задовільну рівномірність поля всередині розчину, що розміщений в стандартній пластиковій пробірці. За

допомоги розробленої експериментальної установки надійно визначено, що імпульсне опромінення навіть продовж 10 секунд на рівні потужності в 200 разів нижче за дозволу нормами на основі теплової дії призводить до стресового стану людських клітин, за яких вони не можуть нормально функціонувати, але збільшення часу опромінення приводить до періодичної зміни станів стресу та релаксації. Проведені дослідження є важливими для розробки поки що відсутніх норм безпечного рівня опромінення людей імпульсними електромагнітними полями, рекомендацій щодо мінімізації їхньої шкідливої дії.

Вперше запропонований і реалізований підхід до визначення товщини діелектрика в шаруватій структурі із відомими електричними параметрами за відбитою імпульсною хвилею за допомогою штучної нейронної мережі, що аналізує прийняте поле в часовому просторі, тобто, в якості вхідних даних використовуються виключно часові відліки амплітуд, а не попередньо обраховані характеристики поля. Цей підхід виділяється високою чутливістю, швидкістю, здатністю правильно апроксимувати проміжні випадки, стійкістю до шумів та помилок у вхідних даних, особливо у випадку згорткової нейронної мережі. Подібні задачі є важливими при неруйнівному контролі та дослідженні біологічних об'єктів. Вперше за допомогою підходу дискретної томографії та променевого методу вироблена нова структура глибокої штучної нейронної мережі з додатковими вхідними даними, обчисленими із звичайного набору вхідних даних, яка характеризується кращою стійкістю класифікації, можливістю зменшення на порядок кількості нейронів без суттєвої втрати якості розпізнавання за рахунок попередньої інтелектуальної обробки інформації на основі наявних знань про фізичні процеси поширення хвиль. Отримані результати є критично важливими для створення новітніх імпульсних підповерхневих радарів, що виявляють і розпізнають різноманітні приховані підповерхневі об'єкти, включаючи протипіхотні міни, в тому числі такі, які майже не мають у складі металевих деталей, що не дозволяє їх виявляти традиційними методами на основі їхніх феромагнітних властивостей.

Вперше запропонована локальна система позиціонування на імпульсних надширокосмугових полях і штучних нейронних мережах, в якій використовується фізичне явище зміни форми випроміненого імпульсу для різних кутів випромінювання. Перевагою такої системи позиціонування по кутам приходу хвиль є відсутність часової синхронізації між приймачем та передавачами. Практична цінність полягає в її стійкості до випадкових чи умисних завад через використання надширокосмугових хвиль, простота реалізації та дешевизна.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці у наукових фахових виданнях України:*

1. N.N. Gorobets, **A.N. Dumin**, O.A. Dumina “About radiation of short pulses by wire antenna of finite length”, Radio Physics and Radio Astronomy, V.7, №4, P.372–374, 2002.

*Внесок здобувача: побудова моделі джерела, числовий розрахунок, аналіз отриманих результатів.*

2. **А.Н. Думин**, В.А. Катрич “Преобразование энергии нестационарной ТЕМ-волны на излучающей апертуре коаксиального волновода”, Вісник Харківського національного університету, Радіофізика та електроніка, №570, С.26–29, 2002.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*

3. **А.Н. Думин**, О.А. Думина, А.Ю. Бутрым, О.А.Третьяков “Нестационарные электромагнитные поля в неограниченном пространстве с произвольным заполнением идеальной средой”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка, Вип. 11, №756, С.61–64, 2007.

*Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*

4. Я.С. Вольвач, **А.Н. Думин**, О.А. Думина “Энергия нестационарного поля, излученного диполем Герца”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка, Вип. 17, №942, С.43–48, 2010.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, ідея ілюстрації енергетичних перетворень полів, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*

5. **А.Н. Думин**, Ю.Г. Шкорбатов, А.И. Чернов, В.А. Катрич “Расчет экспериментальной установки для облучения биологических объектов сверхширокополосным электромагнитным полем”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 24, №1115, С.85–90, 2014.

*Внесок здобувача: вибір початкової конструкції експериментальної установки та її параметрів оптимізації, електродинамічне моделювання експериментальної установки та умов опромінення, розрахував електромагнітні поля та їхню термічну дію, провів аналіз отриманих результатів.*

6. **А.Н. Думин**, В.А. Плахтий, Я.С. Вольвач, О.А. Думина “Зоны излучения импульсного излучателя малых электрических размеров”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка, Вип. 26, С.35–41, 2017.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*

7. **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, О.А. Прищенко “Нестационарное випромінювання імпульсного струму складного просторового розподілу”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка, Вип. 27, С.31–36, 2017.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*

8. **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, О.А. Прищенко, Д.В. Широкоград “Розпізнавання об'єктів під поверхнею землі при надширокосмуговій радіоінтроскопії за допомогою штучних нейронних мереж”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 28, С.24–29, 2018.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розрахунку для отримання часових залежностей надширокосмугових електромагнітних полів, аналіз результатів, формулювання висновків.*

9. **О.М. Думін**, Р.Д. Ахмедов, Д.В. Черкасов “Поширення імпульсної електромагнітної хвилі в керівському середовищі”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка, Вип. 29, С.11–16, 2018.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу послідовних наближень для отримання аналітичного розв'язку, аналіз результатів, формулювання висновків.*

10. **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, І.Д. Персанов, Ш. Као “Система позиціонування на імпульсних надширокосмугових полях”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 31, С.36–46, 2019.

*Внесок здобувача: постановка задачі, ідея використання особливості імпульсних надширокосмугових випромінювачів для визначення положення приймальної системи в просторі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

#### **Наукові праці у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:**

11. V.A. Katritch, **A.N. Dumin** “Radiation of nonstationary fields from an open end of a rectangular waveguide”, Radioelectronics and Communication Systems., vol. 46, no. 11, P. 24-30, 2003. (Scopus)

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв'язання, аналіз отриманих аналітичних і числових результатів, формулювання висновків.*

*Переклад англійською мовою статті*

В.А. Катрич, **А.Н. Думин** “Излучение нестационарных полей из открытого конца прямоугольного волновода”, Изв. ВУЗов, Радиоэлектроника, Т.46, №11, С.34–42, 2003.

12. N.N. Gorobets, **A.N. Dumin**, O.A. Dumina “Transient fields radiated from the open end of a coaxial waveguide with an offset internal conductor”, Telecommunications and radio engineering, vol. 65, no. 17, pp.1563–1570, 2006. (Scopus)

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв'язання, аналіз отриманих числових результатів, формулювання висновків.*

*Переклад англійською мовою статті*

Н.Н. Горобець, **А.Н. Думин**, О.А. Думина “Излучение нестационарных полей из открытого конца коаксиального волновода со смещенным внутренним



проводником”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 10, №712, С.42–46, 2006.

13. **A.N. Dumin**, O.A. Dumina, V.A. Katrich, Yu. Zheng ‘Radiation of Short Pulses from the Open End of a Circular Waveguide’, Telecommunications and radio engineering, vol. 68, no. 20, pp.1785–1793, 2009. (Scopus)

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, ідея використання оператора поширення для задач випромінювання, ідея оператора корекції дифракційних спотворень, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*

*Переклад англійською мовою статті*

**А.Н. Думин**, О.А. Думина, В.А. Катрич, Юн. Джин “Излучение коротких импульсов открытым концом волновода”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 13, №834, С.63–67, 2008.

14. Y.G. Shckorbatov, I.I. Rudneva, V.N. Pasiuga, V.A. Grabina, N.N. Kolchigin, D.D. Ivanchenko, O.V. Kazanskiy, V.G. Shayda, **O.M. Dumin** “Electromagnetic fields effects on *Artemia* hatching and chromatin state”, Central European Journal of Biology, 2010, V.5, N.6, P.785-790, 2010. (Scopus)

*Внесок здобувача: створення електродинамічної моделі Artemia, проведення розрахунків електромагнітних полів та їхньої термічної дії, аналіз отриманих результатів.*

15. Y. G. Shckorbatov, V. N. Pasiuga, E. I. Gonchruk, T. Ph. Petrenko, V. A. Grabina, N. N. Kolchigin, D. D. Ivanchenko, V. N. Bykov, **O. M. Dumin** “Effects of differently polarized microwave radiation on the microscopic structure of the nuclei in human fibroblasts”, Journal of Zhejiang University-SCIENCE B (Biomedicine & Biotechnology), vol. 11, no. 10, pp.801-805, 2010. (Scopus)

*Внесок здобувача: електродинамічне моделювання експериментальної установки, проведення розрахунків електромагнітних полів та їхньої термічної дії, аналіз отриманих результатів.*

16. **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, V.A. Katrich “Evolution of transient electromagnetic fields in radially inhomogeneous nonstationary medium”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 103, vol.103, pp.403–418, 2010. (Scopus)

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, числовий розрахунок, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

17. L.A. Shakina, V. N. Pasiuga, **O. M. Dumin**, Y. G. Shckorbatov “Effects of microwaves on the puffing pattern of *D. melanogaster*”, Central European Journal of Biology, vol. 6, no 4, pp. 524-530, 2011. (Scopus)

*Внесок здобувача: створення електродинамічної моделі яйця дрозофіли, проведення розрахунків електромагнітних полів та їхньої термічної дії, аналіз отриманих результатів.*

18. Y.G. Shckorbatov, V.N. Pasiuga, N.N. Kolchigin, V.A. Grabina, D.D. Ivanchenko, V.I. Bykov, O.M. Dumin “Cell nucleus and membrane recovery after exposure to microwaves” Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B, vol. 65, no. 1/2, pp. 13–20, 2011. (Scopus)

*Внесок здобувача: електродинамічне моделювання умов експерименту, проведення розрахунків електромагнітних полів та їхньої термічної дії, аналіз отриманих результатів.*

19. D.V. Shirokorad, **A.N. Dumin**, O.A. Dumina, V.A. Katrich “Analysis of Pulsed Fields Reflected from a Layered Lossy Medium Using Artificial Neural Network”, Telecommunications and radio engineering, vol. 70, no. 10, pp.873–881, 2011. (Scopus)

*Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

*Переклад англійською мовою статті*

Д.В. Ширококорд, **А.Н. Думин**, О.А. Думина, В.А. Катрич “Анализ импульсных полей, отраженных от слоистой среды с потерями, с помощью искусственной нейронной сети”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 15, №883, С.35–40. 2009.

20. R. Akhmedov, **O. Dumin**, V. Katrich “Impulse radiation of antenna with circular aperture”, Telecommunications and radio engineering, vol.77, no. 20, pp.1767–1784, 2018. (Scopus)

*Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

*Переклад англійською мовою і часткове використання матеріалів статей:*

- **О.М. Думін**, Р.Д. Ахмедов “Міжмодове перетворення нестационарного електромагнітного поля в нелінійному необмеженому середовищі”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 26, С.42–47, 2017.

- **О.М. Думін**, Р.Д. Ахмедов “Випромінювання та розповсюдження електромагнітного сигналу в нелінійному середовищі”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 27, С.37–42, 2017.

- **O.M. Dumin**, O.A. Tretyakov, R.D. Akhmedov, and O.O. Dumina “Evolutionary approach for the problem of electromagnetic field propagation through nonlinear medium”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 24, №1115, С.23–28, 2014.

- **О.М. Думін**, Р.Д. Ахмедов Д.В. “Черкасов Імпульсне випромінювання антени з круговою апертурою в ближній зоні”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 28, С.30–33, 2018.

21. M.V. Nesterenko, V.A. Katrich, Y.M. Penkin, S.L. Berdnik, **O.M. Dumin** “Combined Vibrator – Slot Structures: Theory and Applications. Theoretical Aspects and Applications”, Springer International Publishing, 337 p., 2020. ISBN 978-3-030-60177-5 <https://www.springer.com/gp/book/9783030601768> (дата звернення: 04.01.2021) (Scopus)

*Внесок здобувача: вибір початкової конструкції випромінювача у вигляді надширокосмугової щілини з провідними конусами, електродинамічне моделювання комбінованого випромінювача та покращення його конструкції, дослідження ближнього поля елементарного випромінювача, аналіз отриманих результатів.*

*Включає перекладені англійською мовою матеріали статті:*

**А.Н. Думин**, В.А. Плахтий, Я.С. Вольвач, О.А. Думина “Ближнее нестационарное поле диполя Герца”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 24, №1115, С.29–34, 2014.

#### **Наукові праці у фахових закордонних виданнях:**

22. **О. Dumin**, V. Plakhtii, O. Prishchenko, D. Shyrokorad, V. Katrich “Ultrashort impulse radar for detection and classification of objects in layered medium by artificial neural network”, Telecommunications and radio engineering, vol. 78, no. 19, pp. 1759–1770, 2019.

*Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу числового розрахунку для отримання часових залежностей надширокосмугових електромагнітних полів, аналіз результатів, формулювання висновків.*

*Включає деякі матеріали статті:*

D. Shyrokorad, **О. Dumin**, O. Dumina, V. Katrich “Analysis of parameters of biological objects by neural network processing of reflected impulse electromagnetic field”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 21, №1038, С.89–95, 2012.

#### **Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:**

23. N.N. Gorobets, **A.N. Dumin**, O.A. Dumina “About radiation of short pulses by wire antenna of finite length” presented at the Int. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS-2002), Kharkov, Ukraine, October 1, (CD), 2002.  
*Внесок здобувача: побудова моделі джерела, числовий розрахунок, аналіз отриманих результатів.*
24. **A.N. Dumin**, V.A. Katrich “Energy transformation of a transient wave on radiating aperture” presented at the International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2002), Kiev, Ukraine, September 10-13, pp.189–191, 2002. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*
25. В.А. Катрич, **А.Н. Думин** “Излучение нестационарных полей из открытого конца прямоугольного волновода”, Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». СРСА, Муром (Россия), Июль 1-3, С.77–81, 2003. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних і числових результатів, ідея зменшення небажаних осциляцій, формулювання висновків.*

26. V.A. Katrich, **A.N. Dumin**, O.A. Dumina "Radiation of transient fields from the open end of rectangular waveguide" presented at the IV International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2003), Sevastopol, Ukraine, September 9–12, pp. 583–586, 2003. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв'язання, аналіз отриманих аналітичних і числових результатів, формулювання висновків.*
27. В.О. Катрич, **О.М. Думин**, В.І. Чеботарьов, О.О. Думіна "Нестационарные поля прямоугольных щелиных випромінювачів з кінцевою товщиною хвилеводу", Матеріали Міжнародної наукової конференції "Каразінські природознавчі студії", Харків, Україна, Червень 14–16, С.108–110, 2004. *Внесок здобувача: пропозиція методу розв'язання, аналіз отриманих аналітичних і числових результатів.*
28. V.A. Katrich, **A.N. Dumin**, O.A. Dumina "Radiation of transient fields from two-element array" presented at The Fifth International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW–04), Kharkov, Ukraine, June 21–26, pp.656–658, 2004. *Внесок здобувача: пропозиція методу розв'язання, аналіз отриманих аналітичних і числових результатів.*
29. **A.N. Dumin**, A.Yu. Butrym, O.A. Tretyakov, V.A. Katrich, O.A. Dumina "Transient electromagnetic fields in unbounded space with inhomogeneous medium", presented at the International Workshop Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2004), Sevastopol, Ukraine, September 19–22, P.104–106, 2004. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
30. O. Tretyakov, **A. Dumin**, O. Dumina, V. Katrich "Modal basis method in radiation problems", presented at the International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2004), Dnipropetrovsk, Ukraine, September 14–17, P.312–314, 2004. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
31. **O. Dumin**, O. Dumina, V. Katrich "Evolution of transient electromagnetic fields in spherical coordinate system", presented at the XI-th International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2006), Kharkiv, Ukraine, June 26–29, P.363–365, 2006. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
32. **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, V.O. Katrich "Propagation of spherical transient electromagnetic wave through radially inhomogeneous medium", presented at the 3<sup>rd</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2006), Sevastopol, Ukraine, September 18–22, P.276–278, 2006. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
33. **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, V.O. Katrich "Comparative Analysis of The Analytical and numerical solutions of transient wave propagation problem", presented at the XI-th International Seminar / Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic wave Theory (DIPED–06), Tbilisi, Georgia, October 11–13, P.43–46, 2006. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу*

*розв'язання, числовий розрахунок, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

34. **O. M. Dumin**, O. O. Dumina, Yu Zheng, A.V. Shishkova, V.O. Katrich “Transient radiation from the open end of circular waveguide” presented at the VI International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2007), Sevastopol, Ukraine, September 17-21, pp.181–183, 2007. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв'язання, ідея використання оператора поширення для задач випромінювання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*
35. **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, V.O. Katrich “Controlled transient radiation from the open end of circular waveguide” presented at the XII International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2008), Odesa, Ukraine, June 29 – July 2, pp. 298–300, 2008. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв'язання, ідея оператора корекції дифракційних спотворень, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*
36. **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, V.O. Katrich “Impulse Irradiation of layered medium by the open end of circular waveguide” presented at the 4<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2008), Sevastopol, Ukraine, September 15-19, pp.232–234, 2008. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв'язання, ідея оператора корекції дифракційних спотворень, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*
37. D.V. Shyrokorad, **O.M. Dumin**, O.O. Dumina “Time domain analysis of reflected impulse fields by artificial neural network” presented at the 4<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2008), Sevastopol, Ukraine, September 15-19, pp.124–126, 2008. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
38. **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, D.V. Shyrokorad “Time domain analysis of fields reflected from model of human body surface using artificial neural network” presented at the 3<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation (Eucap–2009), Berlin, Germany, March 23-27, pp.235–238, 2009. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
39. D.V. Shyrokorad, **O.M. Dumin**, O.O. Dumina, V.O. Katrich “Analysis of fields reflected from model of human body surface using artificial neural network in time domain” presented at the VI International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2009), Lviv, Ukraine, October 6-9, pp.351–353, 2009. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

40. **O.M. Dumin**, D.V. Shyrokorad, O.O. Dumina, V.O. Katrich, V.I. Chebotarev “Approximating properties of artificial neural network in time domain for the analysis of electromagnetic fields reflected from model of human body surface” presented at the International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2010), Kharkov, Ukraine, June 21-26, G-8, 2010. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
41. D. Shyrokorad, **O. Dumin**, O. Dumina, V. Katrich “Analysis of transient fields reflected from model of human body surface using convolutional neural network” presented at the XIII International Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2010), Kyiv, Ukraine, September 6-8, TDE-6, 2010. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
42. **O.M. Dumin**, O.A. Tretyakov, V.A. Katrich, O.O. Dumina, M.V. Nesterenko, V.I. Kholodov “Evolutionary equations for electromagnetic fields in unbounded space filled with layered inhomogeneous nonlinear transient medium with losses”, presented at 5<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2010), Sevastopol, Ukraine, September 6-10, P.99–101, 2010. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
43. **O. M. Dumin**, O. O. Dumina, N.N. Kolchigin, D.D. Ivanchenko, Y.G. Shckorbatov, V.N. Pasiuga “Simulation of microwave exposure of human cells by electromagnetic field of EMF band” presented at the International Conference on Antenna Theory and Techniques, Kyiv, Ukraine, September 20-23, pp. 312-314, 2011. *Внесок здобувача: електродинамічне моделювання експериментальної установки, проведення розрахунків електромагнітних полів та їхньої термічної дії, аналіз отриманих результатів.*
44. Y.S. Volvach, **O.M. Dumin**, O.O. Dumina “The energy of the field radiated by Hertz dipole”, presented at the VII International Conf. on Antenna Theory and Techniques (ICATT–2011), Kyiv, Ukraine, September 20-23, pp.86–88, 2011. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, ідея ілюстрації енергетичних перетворень полів, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
45. **O. Dumin**, I.S. Volvach, O. Dumina “Transient Near field of Hertzian dipole” presented at the 6<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2012), Sevastopol, Ukraine, September 17-21, pp. 69–71, 2012. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, ідея ілюстрації енергетичних перетворень полів, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
46. **O.M. Dumin**, V.A. Katrich, R.D. Akhmedov, O.A. Tretyakov, O.O. Dumina “Evolutionary Approach for the Problems of Transient Electromagnetic Field Propagation in Nonlinear Medium”, presented at the XV International Conf. on

- Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2014), Dnipropetrovsk, Ukraine, August 26-28, pp. 57-60, 2014. *Внесок здобувача: постановка задачі, формулювання висновків.*
47. **O.M. Dumin**, O.A. Tretyakov, R.D. Akhmedov, Yu.B. Stadnik, V.A. Katrich, O.O. Dumina “Modal Basis Method for Propagation of Transient Electromagnetic Fields in Nonlinear Medium”, presented at the 7<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2014), Kharkiv, Ukraine, September 15-19, P. 100–103, 2014. *Внесок здобувача: постановка задачі, формулювання висновків.*
48. **O.M. Dumin**, Y.G. Shckorbatov, V.N. Pasiuga, O.V. Kazansky, N.N. Kolchigin, A.I. Chernov “Effect of signal form of irradiated impulse electromagnetic field on viability of human cells” presented at the 7<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2014), Kharkiv, Ukraine, September 15-19, pp. 45–48, 2014. *Внесок здобувача: вибір початкової конструкції експериментальної установки та її параметрів оптимізації, електродинамічне моделювання експериментальної установки та умов опромінення, розрахував електромагнітні поля та їхню термічну дію, провів аналіз отриманих результатів.*
49. **O.M. Dumin**, O.A. Tretyakov, R.D. Akhmedov, O.O. Dumina “Transient electromagnetic field propagation through nonlinear medium in time domain” presented at the 10<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, Ukraine, April 21-24, P. 93-95, 2015. *Внесок здобувача: постановка задачі, формулювання висновків.*
50. **O.M. Dumin**, Y.G. Shckorbatov, A.I. Chernov, V.A. Katrich “Calculation of experimental apparatus for biological object irradiation by impulse electromagnetic field” presented at the 10<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, Ukraine, 21-24 April, pp. 375-377, 2015. *Внесок здобувача: вибір початкової конструкції експериментальної установки та її параметрів оптимізації, електродинамічне моделювання експериментальної установки та умов опромінення, розрахував електромагнітні поля та їхню термічну дію, провів аналіз отриманих результатів.*
51. **O.M. Dumin**, V.A. Plakhtii, I.S. Volvach, S.V. Pshenichnaya, O.O. Dumina “Near field of Hertzian dipole excited by impulse current” presented at the 10<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2015), Kharkiv, Ukraine, 21-24 April, P. 90-92, 2015. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, ідея ілюстрації енергетичних перетворень полів, аналіз отриманих аналітичних результатів, формулювання висновків.*
52. A.I. Chernov, **O.M. Dumin**, D.B. Miroshnik, Y.G. Shckorbatov, V.A. Katrich N.N. Kolchigin “Numerical Simulation and Experimental Investigation of Human Cell Irradiation by Impulse Electromagnetic Field” presented at the of The XX-th International Seminar / Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic wave Theory (DIPED–15), Lviv, Ukraine, 21-24

September, pp.162-164, 2015. *Внесок здобувача: вибір початкової конструкції експериментальної установки та її параметрів оптимізації, електродинамічне моделювання експериментальної установки та умов опромінення, розрахував електромагнітні поля та їхню термічну дію, провів аналіз отриманих результатів.*

53. V. A. Plakhtii, **O. M. Dumin**, V. A. Katrich, O. O. Dumina “Field regions of impulse current radiator of small size”, presented at the 9<sup>th</sup> International Kharkiv Symposium On Physics And Engineering Of Microwaves, Millimeter And Submillimeter Waves (MSMW–2016), Kharkiv, Ukraine, June 21-24, D-27, 2016. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків*
54. V. A. Plakhtii, **O. M. Dumin**, V. A. Katrich, O. O. Dumina, I. S. Volvach “Energy transformation of transient field of herzian dipole” presented at the 16<sup>th</sup> IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET–2016), Lviv, Ukraine, July 5-7, EMA-8, 2016. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків*
55. **O. M. Dumin**, R. D. Akhmedov, V. A. Katrich, O. O. Dumina “Propagation of transient field radiated from plane disk in nonlinear medium” presented at the 8<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2016), Odessa, Ukraine, September 5-11, P. 77–80, 2016. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
56. V. A. Plakhtii, **O. M. Dumin**, V. A. Katrich, O. O. Dumina, I. S. Volvach “Radiation of two small impulse current radiators”, presented at the 8<sup>th</sup> International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2016), Odessa, Ukraine, September 5-11, pp. 81–84, 2016. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
57. **O. Dumin**, R. Akhmedov, O. O. Dumina “Transient field radiation of plane disk into nonlinear medium” *Праці IEEE Міжнародної конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo’2016), Київ, Україна, вересень 11-15, P. 148–151, 2016. Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
58. **O. Dumin**, S. Khmara, D. Shyrokora “Artificial Neural Networks in Time Domain Electromagnetics” presented at the 11<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2017), Kyiv, Ukraine, 24-27 May, pp. 118-121, 2017. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку*



*електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

59. **O.M. Dumin**, R.D. Akhmedov, V.A. Katrich, O.O. Dumina “Transient Radiation of Circle with Uniform Current Distribution” presented at the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, May 29-June 2, P. 261-265, 2017. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
60. V.A. Plakhtii, **O.M. Dumin**, O.A. Prishchenko “Transient Radiation of System of Four Noncollinear Dipoles” presented at the IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, May 29-June 2, pp. 225-228, 2017. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*
61. V.A. Plakhtii, **O.M. Dumin**, O.A. Prishchenko “Near Radiation Zone of Six Short Impulse Radiators” presented at the IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), Lviv, Ukraine, October 17-20, pp. 251-254, 2017. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розв’язання, аналіз отриманих аналітичних та числових результатів, формулювання висновків.*
62. **O. Dumin**, O. Prishchenko, G. Pochanin, V. Plakhtii, D. Shyrokorad “Subsurface Object Identification by Artificial Neural Networks and Impulse Radiolocation”, presented at the IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP-2018), Lviv, Ukraine, August 21-25, pp. 434-437, 2018. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розрахунку для отримання часових залежностей надширококустових електромагнітних полів, аналіз результатів, формулювання висновків.*
63. **O. Dumin**, R. Akhmedov “Ultrashort Impulse Radiation from Plane Disk with Uniform Current Distribution”, presented at the 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2018), Odessa, Ukraine, September 4-7, P. 169–173, 2018. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
64. **O.M. Dumin**, O. Prishchenko, D. Shyrokorad, V. Plakhtii “Application of UWB Electromagnetic Waves for Subsurface Object Location Classification by Artificial Neural Networks” presented at the 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS–2018), Odessa, Ukraine, September 4-7, pp. 290–293, 2018. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу розрахунку для отримання часових залежностей надширококустових електромагнітних полів, аналіз результатів, формулювання висновків.*
65. **O.M. Dumin**, V.A. Plakhtii, O.A. Prishchenko, and D.V. Shyrokorad “Neural Network Application in Object Classification by Impulse Radiolocation” presented

- at Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence (ISDMCI–2019), Zaliznyi Port, Ukraine, May 21-25, pp. 61–63, 2019. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу числового розрахунку електромагнітних полів та аналізу відбитої хвилі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
66. **O. Dumin**, R. Akhmedov, O. Dumina, D. Cherkasov “Near zone of plane disk with uniform transient current distribution” presented at the 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019, Lviv, Ukraine, July 2-6, pp. 209-213. *Внесок здобувача: постановка задачі, вибір часових залежностей збудження нестационарного джерела, ідея аналізу енергетичних параметрів електромагнітного поля, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*
  67. **O. Dumin**, V. Plakhtii, D. Shyrokorad, O. Prishchenko, G. Pochanin “UWB subsurface radiolocation for object location classification by artificial neural networks based on discrete tomography approach”, presented at the IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019, Lviv, Ukraine, July 2-6, pp. 182-187, 2019. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція підходу методу дискретної томографії, аналіз результатів, формулювання висновків.*
  68. R. Akhmedov, **O. Dumin**, V. Katrich, D. Cherkasov “Impulse Electromagnetic Wave Propagation in Kerr Medium”, DIPED 2019, Lviv, Ukraine, 12-14 September, P. 49-52, 2019. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція методу послідовних наближень для отримання аналітичного розв’язку, аналіз результатів, формулювання висновків.*
  69. V. Plakhtii, **O. Dumin**, O. Prishchenko, D. Shyrokorad, G. Pochanin “Influence of Noise Reduction on Object Location Classification by Artificial Neural Networks for UWB Subsurface Radiolocation” presented at the DIPED 2019, Lviv, Ukraine, 12-14 September, P. 64-68. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*
  70. I. Persanov, **O. Dumin**, V. Plakhtii, D. Shyrokorad “Subsurface Object Recognition in a Soil Using UWB Irradiation by Butterfly Antenna” presented at the DIPED 2019, Lviv, Ukraine, 12-14 September, pp. 160-163. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*
  71. **O.M. Dumin**, V.A. Plakhtii, D.V. Shyrokorad, O.A. Prishchenko “Signal Processing in UWB Subsurface Radiolocation by Artificial Neural Networks” presented at the 2019 IEEE International Scientific and Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T’2019), Kyiv, Ukraine, October 08-11, pp. 384–387, 2019. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*
  72. **O. Dumin**, V. Plakhtii, I. Persanov, C. Shuaishuai “Positioning System Using Classification of Ultra Short Electromagnetic Pulse Forms by ANN” presented at the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. *Внесок здобувача: постановка задачі, ідея*

*використання особливості імпульсних надширокосмугових випромінювачів для визначення положення приймальної системи в просторі, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.*

73. Д.В. Широкоград, **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, Г.В. Корніч “Обработка сигналов при подповерхневой радиолокации штучными нейронными сетями”, Міжнародний науково-практичний семінар «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», Запоріжжя-Кропивницький, Україна, 15-16 травня, с. 384–387, 2020. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*
74. **О. Думін**, V. Plakhtii, O. Pryshchenko, G. Pochanin “Comparison of ANN and Cross-Correlation Approaches for Ultra Short Pulse Subsurface Survey” presented at the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET – 2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*
75. **О. Думін**, P. Fomin, V. Plakhtii, M. Nesterenko “Ultrawideband Combined Monopole-Slot Radiator of Clavin Type” presented at the IEEE XXVth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2020), September 15-18, pp. 32–36, 2020. *Внесок здобувача: вибір початкової конструкції випромінювача у вигляді надширокосмугової щілини з провідними конусами, електродинамічне моделювання комбінованого випромінювача та покращення його конструкції, дослідження ближнього поля елементарного випромінювача, аналіз отриманих результатів.*

#### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

76. Г.П. Почанін, **О.М. Думін**, «Випромінювачі нестаціонарних імпульсних електромагнітних полів із заданими часовими характеристиками», в «Випромінюючі структури багатофункціональних радіоелектронних систем. Теорія і застосування», під ред. Катрича В.О., Bueu Bassin: Lambert Academic Publishing, 390 с., 2017. ISBN 978-620-2-07324-0. *Внесок здобувача: постановка задачі, числове моделювання, формулювання висновків.*
77. Патент на корисну модель. 126410 Україна, (51) МПК G01R 33/12, (2006.01) Спосіб вимірювання частотної залежності магнітної проникності феритових стрижнів / Огурцова Т.М., Почанін Г.П., Холод П.В., **Думін О.М.**, Бердник С.Л. Власник: Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова національної академії наук України; – u201708915; дата подання 07.09.2017; дата, з якої чинні права, опубліковано 25.06.2018, Бюл. № 12/2018. *Внесок здобувача: аналіз літературних джерел, обговорення формули корисної моделі.*
78. **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, О.А. Прищенко, Д.В. Широкоград “Метод дискретної томографії при обробці даних надширокосмугової підповерхневої радіолокації штучною нейронною мережею”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка,

Вип. 29, С.17–26, 2018. *Внесок здобувача: постановка задачі, пропозиція підходу методу дискретної томографії, аналіз результатів, формулювання висновків.*

79. І.Д. Персанов, **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, Д.В. Широкоград “Розпізнавання об'єктів під поверхнею ґрунта за допомогою імпульсного опромінювання антеною типу «метелик» та штучної нейронної мережі”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 29, С.27–34, 2018. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*

80. **О.М. Думін**, В.А. Плахтій, О.А. Прищенко, Д.В. Широкоград, Я.С. Вольвач “Вплив зменшення шуму вхідного сигналу на класифікацію місцезнаходження об'єкту штучною нейронною мережею при надширокосмуговій радіоінтроскопії”, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Радіофізика та електроніка, Вип. 31, С.27–35, 2019. *Внесок здобувача: постановка задачі, аналіз результатів, формулювання висновків.*

## АНОТАЦІЯ

Думін О. М. Випромінювання і розповсюдження нестаціонарних електромагнітних полів у нелінійних, нестаціонарних та біологічних середовищах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено дослідженню процесів випромінювання та поширення нестаціонарних електромагнітних полів у необмежених нелінійних, нестаціонарних, шарувато неоднорідних, поперечно неоднорідних, а також біологічних середовищах методами у часовому просторі.

Розвинуто еволюційний підхід до задач випромінювання та поширення нестаціонарних електромагнітних хвиль на випадок необмеженого поперечно неоднорідного нестаціонарного середовища, радіально-неоднорідного, нелінійного середовищ. Отримані уточнені аналітичні вирази для ближніх нестаціонарних полів диполя Герца за допомогою методу векторного потенціалу у часовому просторі. Досліджені явища формування нестаціонарної електромагнітної хвилі у ближній зоні низки випромінювачів, таких як відкриті кінці прямокутного, круглого та коаксіального хвилеводів тощо. Вивчені енергетичні характеристики імпульсних електромагнітних полів у біологічних тканинах і середовищах. Досліджені підходи на основі застосування штучних нейронних мереж для обробки відбитих імпульсних електромагнітних полів з метою визначення параметрів шаруватих середовищ, розпізнавання прихованих металевих і діелектричних включень у задачах підповерхневого зондування.

**Ключові слова:** нестационарне випромінювання, еволюційні рівняння, неоднорідне середовище, нелінійне середовище, ближня зона, біологічне середовище, підповерхневе зондування, штучна нейронна мережа, розпізнавання об'єктів, система позиціонування.

## ABSTRACT

Dumin O. M. Radiation and propagation of nonstationary electromagnetic fields in nonlinear, nonstationary and biological media. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences in specialty 01.04.03 – Radio Physics. V. N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to research of processes of radiation and propagation of transient electromagnetic fields in unbounded nonlinear, nonstationary, layered inhomogeneous, transversely inhomogeneous, and, also, biological media by time domain methods.

The evolutionary approach to the problems of radiation and propagation of transient electromagnetic waves, which reduces the dimension of such problems by two units in the case of an unbounded transversely inhomogeneous, radially inhomogeneous, nonlinear, nonstationary medium, has been developed. General analytical solutions of the problems for the case of radially inhomogeneous medium by the Laplace transform method, for the case of weak nonlinear medium by perturbation approach are constructed. As an example, the problem of impulse wave radiation by a small loop excited by transient current surrounded by the sphere of radially inhomogeneous dielectric is solved by means of analytical and numerical-analytical methods. The development of the evolutionary approach to such problems allows to optimize effectively the electromagnetic devices by significant acceleration of the calculation of their characteristics and reducing the amount of RAM needed. The problem of propagation of a transient wave in a nonlinear medium is analytically solved in time domain by the method of evolutionary equations and perturbation theory. For the case of weak Kerr cubic nonlinearity, modal wave transformations, time forms of distorted fields are obtained for the first time.

For the first time, the corrected analytical expressions for the transient near fields of Hertz dipole were obtained using the vector potential method in time domain. The obtained improvement allows, in comparison with classical expressions, to describe correctly the formation of an electromagnetic wave in the near zone of the radiator. The analytical expressions for the fields are obtained by taking into account the bigger number of terms of the series, which expands the solution of this problem for the vector potential in the form of quadrature.

The phenomena of transient electromagnetic wave formation in near zone of several radiators, i.e. open ends of rectangular, circular, coaxial waveguides, are investigated. The ultrawideband analogue of the Klevin vibrator-slotted radiator based on the impulse slot antenna by Barnes and ultrawideband short-circuited dipoles in the

form of metal cones was created and studied. The operator of wave propagation in a waveguide and a new diffractive distortion correction operator were used to generate short sounding field pulses in space using traditional transmission lines with strong frequency dispersion. The analytical solutions of the problem of radiation of impulse electromagnetic fields by powerful railguns in the moment of break of its electrical circuit are obtained. Time forms of fields at arbitrary distances and values of distances to the boundary of the far zone of such a radiator are received. The peculiarities of such nonstationary radiation in the immediate vicinity of the aperture are analyzed.

The transient electromagnetic fields in biological structures and organisms are studied. The setup for irradiation of biological solutions by ultrawideband fields with high uniformity of field distribution was calculated. For remote sensing problems of geometric and electrical parameter determination of layered structures, the use of artificial neural networks in time domain was proposed and implemented for the first time, when the input data are time samples of field amplitude without pre-processing, including spectral. The similar approach solves the problem of detecting metal objects situated underground and determining the depth of their occurrence by irradiating the ground surface with impulse ultrawideband field of a plane wave or point irradiator and analysis of the reflected wave by an artificial neural network. The pre-processing of the received signals based on the approach of discrete tomography is proposed, which allows improving the recognition at certain depths and significantly reduce the amount of processed data and simplify the structure of the neural network. The new system of local positioning on impulse ultrawideband fields is proposed and calculated. It is based on the approach of determining the angles of arrival of the wave and is realized due to the exceptional property of ultrawideband pulsed radiators to change the time shape of radiated pulses depending on the angle of radiation and extremely high sensitivity of the artificial neural networks for the changes. Such a system does not require the time synchronization of transmitters both with each other and with the receiver. It is resistant to intentional or accidental interference due to the ultrawide bandwidth used.

**Keywords:** transient radiation, evolutionary equations, inhomogeneous medium, nonlinear medium, near zone, biological medium, subsurface sounding, artificial neural network, object recognition, positioning system.